

DETECÇÃO REMOTA APLICADA AO ESTUDO DA EVOLUÇÃO MORFOSEDIMENTAR DA PARTE TERMINAL DO ESTUÁRIO DO RIO MIRA

(Versão corrigida e melhorada após defesa pública)

Cristina Maria Pinto da Gama

**Dissertação de Mestrado em Ordenamento do Território e Sistemas de
Informação Geográfica**

Outubro, 2020

Dissertação apresentada para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ordenamento do Território e Sistemas de Informação Geográfica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor José António Tenedório.

*Aos meus pais, Maria Ana e Elísio,
pelo seu testemunho de Vida.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor José António Tenedório por ter aceitado orientar esta dissertação, pelos seus ensinamentos e pela revisão do texto final.

Ao Filipe Calleja e à Marieke Laengner pela sua generosidade ao responderem às dúvidas que lhes coloquei relativamente às metodologias empregues em dois dos seus artigos, em tempos de pandemia e apesar de não nos conhecermos pessoalmente.

À Isabel Pinheiro e ao André Matoso, da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Alentejo, pela disponibilização dos levantamentos batimétricos realizados no Rio Mira, ao abrigo do projecto Sociedade Polis Litoral Sudoeste, SA.

Ao Carlos Álvaro pela partilha sobre a instalação do *plugin* SenCor (SNAP).

Ao Joca pelos seus esclarecimentos relativos à linguagem *Phyton*.

Ao Fernando pela disponibilização das imagens de drone.

Aos meus amigos, Minita e Quim, pela sua Amizade.

À família Castro Pereira pelas partilhas familiares saudáveis e inspiradoras.

Aos meus pais e irmã pelo seu apoio incondicional na realização deste novo projecto e pela bravura com que têm resistido à ameaça da pandemia da COVID-19.

Aos meus queridos três filhos e ao meu marido, amores da minha vida, agradeço a forte presença e a compreensão por me ter remetido a um confinamento adicional para me dedicar à elaboração desta dissertação.

DETECÇÃO REMOTA APLICADA AO ESTUDO DA EVOLUÇÃO MORFOSEDIMENTAR DA PARTE TERMINAL DO ESTUÁRIO DO RIO MIRA

Cristina Maria Pinto da Gama

RESUMO

PALAVRAS-CHAVE: Detecção Remota; Sentinel-2, Estuário; Unidade morfossedimentar; Índices espectrais.

O presente estudo analisa imagens de Detecção Remota Sentinel-2 (Programa Copernicus) com o objectivo de caracterizar a evolução das unidades morfossedimentares (UMFS) da zona intertidal da parte terminal do estuário do Rio Mira.

A análise da informação topográfica (MDT) e geológica da região de Vila Nova de Milfontes-Cercal-São Luís evidencia que o relevo é condicionado pela existência de diferentes tipos de rochas do substrato que apresentam diferentes graus de resistência à erosão. A aplicação da ferramenta “hillshade” do ArcGIS indicou que o traçado do Rio Mira está controlado por sistemas de falhas com orientação NNW-SSE e WNW-ESE.

A definição das UMFS com características distintas a jusante e a montante da ponte sobre o Rio Mira baseou-se na análise não supervisionada (“*K-Means*”) dos índices espectrais NDVI, NWI e NDWI de três imagens Sentinel-2 (2015, 2018 e 2019 adquiridas durante a Baixa-Mar, BM). As classes de raso de maré e de sapal ocupam $\approx 1.8 \text{ km}^2$ da zona intertidal. A área da classe do raso de maré foi estimada em $\approx 0.50 \text{ km}^2$ (montante) e $\approx 0.04 \text{ km}^2$ (jusante). Variações na área de raso de maré que está coberta por “ervas marinhas” dificultaram a definição do limite que separa esta classe do sapal que ocupa $\approx 0.96 \text{ km}^2$. A análise comparativa da extensão da zona intertidal inundada “Marés Vivas” *versus* “Marés Mortas” (coincidente com a Praia-Mar) permitiu estimar áreas da superfície intertidal total coberta de sapal: alto (0.36 km^2), médio (0.26 km^2) e baixo (0.34 km^2). A área ocupada pelo baixo sapal torna-se progressivamente menor e irregular para jusante, adquirindo um padrão em “manchas”.

A evolução morfológica da barra arenosa da Praia da Franquia foi analisada após a sua dragagem em Julho de 2017, usando o índice NDWI em 14 imagens Sentinel-2

adquiridas entre 2015 e 2020 com um espaçamento temporal mínimo de dois meses e coincidentes com a BM. Após nove meses da dragagem, surgiu uma nova barra com uma geometria linear que evoluiu para uma “meia-lua”, e que três anos depois apresenta configuração em “U” muito semelhante à que existia antes da dragagem. A estimativa da área emersa da barra arenosa é comparável à batimétrica 1m ZH (*datum* altimétrico). As praias estuarinas e a praia emersa oceânica apresentam variações que podem indicar trocas sedimentares entre a barra de vazante e a praia imersa.

A evolução da área das classes de sapal e de raso de maré foi igualmente avaliada usando o “*script*” de Laengner e co-autores, usando imagens de satélite Landsat adquiridas entre 1986 e 2010 (“*Google Earth Engine*”). Esta metodologia apresenta algumas limitações se aplicadas ao estuário do Rio Mira, dificultando a tentativa de operacionalização de uma árvore de decisão, baseada na aplicação de limiares aos índices NDVI e NDWI. Apesar das imagens Landsat abrangerem um longo período de 24 anos, não foi possível encontrar imagens totalmente coincidentes com a BM, o que impossibilitou obter a estimativa real da evolução da área coberta por cada uma das classes da zona intertidal do estuário do Rio Mira.

ABSTRACT

KEYWORDS: Remote Sensing, Sentinel-2, Estuary; Morpho-Sedimentary Unit; Spectral Indices.

This study analyzes Sentinel-2 Remote Sensing images (Copernicus Programme) to characterize the evolution of the morphosedimentary units (UMFS) in the intertidal zone of the terminal part of the River Mira estuary.

The analysis of topographic (MDT) and geological information of the Vila Nova de Milfontes-Cercal-São Luís region show that the relief is conditioned by the existence of different types of rocks composing the basement, which have different degrees of resistance to erosion. The application of ArcGIS’s hillshade tool indicated that the Rio Mira configuration is controlled by fault systems with NNW-SSE and WNW-ESE orientation.

The definition of UMFS with different characteristics downstream and upstream of the bridge over the Mira River was based on the unsupervised classification (K-Means) of the spectral indices NDVI, NWI, and NDWI of three Sentinel-2 images (2015, 2018, and 2019 acquired during Low-Tide, LT). The classes of tidal flat and salt marshes occupy $\approx 1.8 \text{ km}^2$ of the intertidal zone. The area of the mud flat class was estimated at $\approx 0.50 \text{ km}^2$ (upstream) and $\approx 0.04 \text{ km}^2$ (downstream). Variations in the mud flat that is covered by “seagrass” made it difficult to define the limit that separates this class from the salt marshes that occupy $\approx 0.96 \text{ km}^2$. The comparative analysis of the extension of the flooded intertidal zone “Spring Tides” *versus* “Neap Tides” (coinciding with High Tide) made it possible to estimate areas of the total intertidal surface covered with marshland: high (0.36 km^2), medium (0.26 km^2) and low (0.34 km^2). The area occupied by the low salt marshes becomes progressively smaller and irregular downstream, acquiring a pattern in “patches”.

The morphological evolution of the sand bar at Praia da Franquia was analyzed after its dredging process in July 2017, using the NDWI index on 14 Sentinel-2 images acquired between 2015 and 2020 with a minimum time spacing of two months and coinciding with the LT. After nine months of dredging, a new bar appeared with a linear geometry that evolved into a “half-moon”, which three years later has a “U” configuration very similar to the one that existed before the dredging process. The estimated surface area of the sandy bar is comparable to the 1m ZH bathymetric (altimetric datum). The estuarine beaches, the oceanic emerged beach, and the adjacent dune field show variations that may indicate sedimentary exchanges between the ebb and the immersed beach.

The evolution of the salt marsh and mud flat classes was also assessed using the “script” by Laengner and co-authors, using Landsat satellite images acquired between 1986 and 2010 (“Google Earth Engine”). This methodology has some limitations if applied to the Rio Mira estuary, making it difficult to attempt to operationalize a decision tree, based on the application of thresholds to the NDVI and NDWI indices. Although the Landsat images span a long period of 24 years, it was not possible to find images that coincided with the LT, which made it impossible to obtain a realistic estimate of the evolution of the area covered by each of the classes in the intertidal zone of the Rio Mira estuary.

Índice

Introdução	1
Capítulo I- Caracterização da área de estudo	5
I.1. Enquadramento geológico e geomorfológico do Rio Mira	5
I.2. Terminologia e conceitos	13
I.2.1- Descrição do modelo de ambiente sedimentar estuarino	13
I.2.2- Escalas temporal e espacial dos processos sedimentares no ambiente sedimentar estuarino	15
I.2.3- Principais unidades morfossedimentares (UMFS)	19
Capítulo II - Métodos de Detecção Remota aplicados ao estudo de zonas estuarinas....	24
II.1- Estado da arte	24
II.1.1- Bandas derivadas e classificação não supervisionada	28
II.1.2- Dados de satélite	32
II.1.2.1- Dados Sentinel-2.....	34
II.1.2.2- Pré-processamento das imagens de satélite Sentinel-2	35
II.1.2.3- Dados de satélite Landsat 5 TM	37
II.1.3 - Definição das áreas de interesse	38
II.1.4 - Processamento das imagens Sentinel-2	42
II.1.4.1- Procedimento metodológico aplicado à zona intertidal	42
II.1.4.2- Procedimento metodológico aplicada à evolução da barra arenosa	46
II.1.5- Pós-processamento	49
II.1.5.1 - Avaliação dos métodos de classificação.....	50
II.1.6 - Processamento das imagens Landsat 5 TM (1986-2010) no “Google Earth Engine” (GEE)	53
Capítulo III. Resultados e discussão	56
III.1- Análise geomorfológica e geológica do estuário do Rio Mira	56
III.1.1- Modelo Digital de Terreno e representação tridimensional “hillshade”	56
III.2- Limites das principais UMFS do estuário do Rio Mira	63

III.2.1- Caracterização das classes de ocupação de referência	70
III.2.1.1- Avaliação da exactidão da classificação	74
III.2.2- Análise interanual das classes de ocupação (2015-2018-2019)	79
III.2.2.1- Proposta de um “proxy” para a delimitação do raso de maré	81
III.2.3- Padrão de submersão da zona intertidal em função da amplitude do ciclo de maré	88
III.3- Evolução da barra arenosa no sector distal do estuário do Rio Mira (2015 a 2020).	96
III.3.1- Validação do método com dados topo-hidrográficos	102
III.4- Identificação do padrão evolutivo do sapal e do raso de maré à escala temporal de 30 anos (1986-2010, Landsat 5TM)	111
III.4.1- Análise comparativa com dados de fotografia aérea	113
 Capítulo IV. Conclusões	 118
 Bibliografia	 124
Índice de Figuras	134
Índice de Tabelas	141
 ANEXOS	 142

Introdução

A aquisição de dados geográficos fidedignos é essencial ao processo de decisão por parte de instituições públicas com responsabilidade na gestão e ordenamento do território. A introdução no processo de decisão de informação geográfica previamente analisada, e que constitui a base de modelos de previsão validados, é um importante benefício societal (Fig. 1A). A necessidade de melhorar a qualidade dos dados de informação geográfica tende a fomentar o aperfeiçoamento dos métodos através do *feedback* contínuo de optimização e redução das lacunas da sua aquisição usando sistemas de observação da Terra (CENR/IWGEO, 2005 *in* Liang et al.2012) (Fig. 1A). O programa europeu Copernicus é um dos principais sistemas de aquisição de dados de informação geográfica do “*Global Earth Observation System of Systems (GEOSS)*”. O programa Copernicus visa a superação dos Desafios Societais através da disponibilização gratuita de dados de Detecção Remota aos cidadãos, autoridades públicas, decisores políticos, cientistas e empreendedores. Este programa Europeu dispõe de seis serviços (“*Six Copernicus Services*”) que disponibilizam os dados de Detecção Remota sobre diferentes áreas temáticas: “*Emergency Management*”, “*Land Monitoring*”, “*Atmosphere Monitoring*”, “*Climate Change*”, “*Marine Environment Monitoring*” e “*Security*” (<https://www.copernicus.eu/en/services>). O programa Copernicus também disponibiliza o processamento dos dados, a sua integração com outras fontes de informação científica, ao mesmo tempo que proporciona a validação dos resultados obtidos (e.g. NEREUS, 2018).

Os dados de Detecção Remota são uma fonte de informação geográfica com um grande espectro de aplicação cujo carácter interdisciplinar está na base da conceptualização das Ciências de Informação Geográfica. A Detecção Remota está estreitamente relacionada com a Cartografia, a Topografia e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (Fig. 1B), que são comumente aplicadas a estudos de Ciências Físicas, de Ciências Biológicas e de Ciências Sociais, e relacionadas com a Matemática.

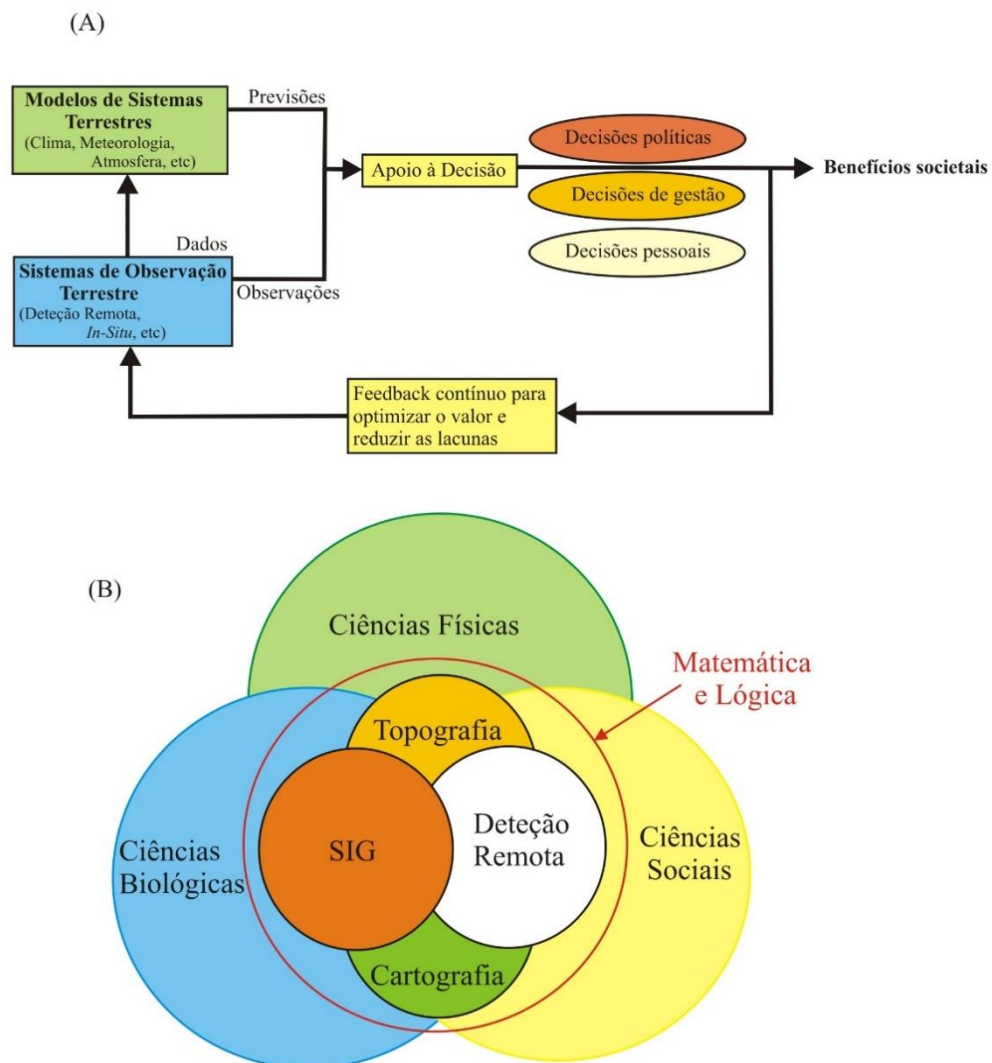


Figura 1 - (A)- Relação entre observações da Terra e os benefícios sociais (CENR / IWGEO, 2005; adaptado de Liang et al. 2012); (B)- Modelo de interação que descreve a relação das Ciências da Informação Geográfica (Detecção Remota, Sistemas de Informação Geográfica, Cartografia e Topografia) e outras áreas de investigação como a Matemática e a Lógica, as Ciências Físicas, as Ciências Biológicas e as Ciências Sociais (adaptado de Jensen, 2014).

Na presente dissertação de Mestrado são utilizados dados de Detecção Remota com o objectivo de estudar a evolução dinâmica de ambientes sedimentares costeiros, e em particular, do ambiente estuarino. As metodologias que são aplicadas nesta tese

demonstram a importância da interação entre a Detecção Remota e outras áreas de investigação, que está ilustrada na Figura 1B, de que é exemplo, a interacção com processos físicos (e.g. o ciclo da maré, o tipo e o transporte de sedimentos) e biológicos (e.g. a produtividade das comunidades vegetais).

Esta dissertação de Mestrado pretende contribuir para avaliar a aplicabilidade dos dados ópticos adquiridos através dos satélites do programa Copernicus, missão Sentinel-2, da Agência Espacial Europeia (“*European Space Agency*”, *ESA*), no desenvolvimento de linhas de investigação sobre a dinâmica sedimentar da parte terminal do estuário do Rio Mira. Os principais objectivos a alcançar com o estudo baseado em dados de Detecção Remota são: i) a delimitação de cada uma das unidades morfossedimentares que se observam na parte terminal do estuário do Rio Mira (e.g. praias estuarinas, diferentes níveis de sapal, raso de maré, barras arenosas e campo dunar) com uma resolução espacial de 10 m; ii) a identificação do padrão evolutivo das diferentes unidades morfossedimentares tendo por base uma escala temporal curta de 5 anos; e iii) a caracterização do padrão de evolução de uma barra arenosa localizada junto à foz do Rio Mira, que foi alvo de uma dragagem no Verão de 2017. Para além destes objectivos, também se pretendeu descrever de forma resumida o enquadramento geológico e geomorfológico da parte terminal do estuário do Rio Mira, recorrendo à compilação e análise de dados previamente publicados sobre a Geologia, conjuntamente com dados de altimetria que permitiram gerar um modelo digital de terreno (MDT).

Esta dissertação de Mestrado está organizada em quatro capítulos.

O capítulo I está dividido em dois subcapítulos. O subcapítulo I.1 descreve o enquadramento geológico e geomorfológico da área de estudo, realçando a análise dos dados relativos ao modelo digital de terreno e revelando a importância das condicionantes geológicas na interpretação da geomorfologia. O subcapítulo I.2 apresenta de forma resumida os fundamentos teóricos do modelo de ambiente sedimentar estuarino, dando ênfase às escalas temporal e espacial dos processos sedimentares envolvidos na formação e evolução das diferentes unidades morfossedimentares aí existentes (praias estuarinas, sapal, raso de maré e barras arenosas).

O capítulo II, divide-se em sete subcapítulos, iniciando-se pela apresentação do estado da arte relativo aos métodos de detecção remota aplicados ao estudo de zonas estuarinas; seguindo-se a caracterização dos dados de satélite Sentinel-2 e Landsat 5 TM; a definição das áreas de interesse obtidas através da aplicação das máscaras; a descrição do procedimento metodológico aplicada à zona intertidal e ao estudo da evolução de barras arenosas; a descrição do pós-processamento e da avaliação dos métodos de classificação dos dados Sentinel-2; terminando com a descrição do processamento de imagens Landsat 5 TM usando um *script* na consola do “*Google Earth Engine*” (GEE). É ainda, apresentado e descrito um fluxograma metodológico relativo ao processamento das imagens de satélite, o qual permite acompanhar as diferentes etapas de pré-processamento; processamento e de pós-processamento.

O capítulo III, apresenta os resultados que foram obtidos através da análise dos dados de Detecção Remota, e a discussão dos mesmos à luz do estado da arte. Destaca-se que: i) a delimitação e caracterização das unidades morfossedimentares de sapal e de raso de maré foram detalhadas para as datas de 2015, 2018 e 2019; ii) a caracterização da evolução da morfologia das barras arenosas foi realizada tendo por base um total de catorze imagens de satélite Sentinel-2, adquiridas entre Agosto de 2015 e Setembro de 2020; e iii) a disponibilidade de dados auxiliares (fotografia aérea e levantamentos topo-hidrográficos) foram essenciais para permitir a validação de parte dos resultados obtidos.

Por fim, o capítulo IV inclui as principais conclusões do trabalho de investigação desenvolvido, dando particular destaque à aplicabilidade dos dados ópticos Sentinel-2 na descrição e monitorização de processos sedimentares estuarinos, constituindo uma ferramenta com inegável interesse para enfrentar Desafios Societais plasmados nos instrumentos de gestão territorial (IGT), como sejam, os Programas da Orla Costeira (POC) e os Planos de Ordenamento dos Estuários (PEOT).

Capítulo I- Caracterização da área de estudo

I.1. Enquadramento geológico e geomorfológico do Rio Mira

Estado da arte

A área de estudo do estuário do Rio Mira, cujo troço terminal se localiza em Vila Nova de Milfontes, no sudoeste da Península Ibérica, faz parte do Parque Natural do Litoral Sudoeste Alentejano e Costa Vicentina (Fig. 2). O Rio Mira tem um traçado com cerca de 132 km, que por vezes pode ser bastante sinuoso, nomeadamente, entre a Serra do Caldeirão, onde se localiza a sua nascente, e Vila Nova de Milfontes, onde desagua no Oceano Atlântico.

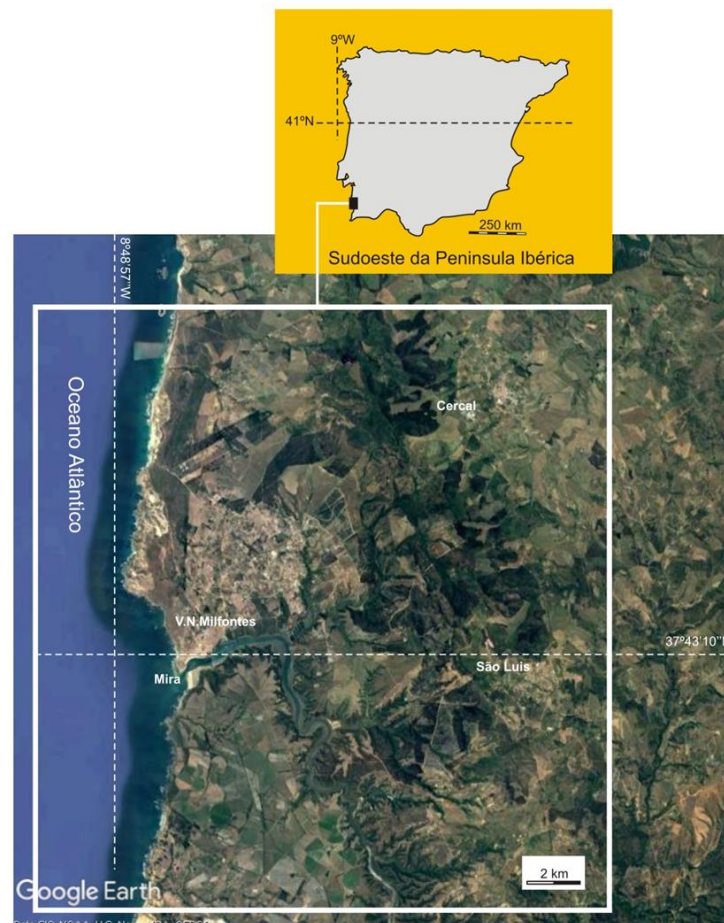


Figura 2- Localização da área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís no sudoeste da Península Ibérica e no litoral do Alentejo (Excerto de imagem do “Google Earth Pro”).

O troço do Rio Mira seleccionado para o presente estudo está situado a norte da Serra de Monchique, e corresponde à sua parte terminal numa extensão de cerca de 16 km, no que se designa por estuário do Rio Mira. O limite do estuário do Rio Mira é definido pelo ponto do leito do rio que a maré dinâmica consegue alcançar, e que fica próximo de Odemira. No estuário do Rio Mira, o transporte em direcção ao Oceano Atlântico é para norte, ao longo de um traçado, por vezes sinuoso, mas com orientação geral segundo NNW-SSE que se mantem por 12.5 km, rodando para WSW-ENE nos últimos 3.5 km até atingir a foz (Fig. 2).

Geomorfologicamente, a linha de costa na área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís caracteriza-se por uma arriba constituída essencialmente por rocha consolidada, com altitude variável, que chega a apresentar dezenas de metros de altura (Ramos Pereira, 1990). O topo da arriba representa uma superfície aplanada relativamente elevada, designada por planície litoral ocidental, que se estende para o interior e termina no sopé da Serra do Cercal (Feio, 1951; Ramos Pereira e Ramos, 2020) (Fig. 3).



Figura 3- A planície litoral, a Serra do Cercal, a arriba e o Rio Mira na área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís. Representação tridimensional do relevo desde a linha de costa e a foz do Rio Mira na direcção do interior, para Leste, até ao sopé da Serra do Cercal (Excerto de imagem do “Google Earth Pro”).

Esta superfície aplanada também é designada por antiga planície litoral Plio-Pleistocénica, esta antiga planície litoral com menos de c. 5 Ma (milhões de anos) terá sido talhada discordantemente sobre rochas sedimentares e vulcânicas paleozóicas com idades que variam entre c. 370 e c. 315 Ma que pertencem à Zona Sul-Portuguesa (Devónico superior-Carbónico; Oliveira, 1984), que constitui uma das principais unidades tectónicas em que se divide o Maciço Ibérico pré-Mesozóico.

A Figura 4 representa uma adaptação da Carta Geológica de Portugal na escala 1:200,000, que assinala as principais unidades geológicas observadas na região de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís, onde se localiza o estuário do Rio Mira.

O mapa geológico simplificado que está ilustrado na Figura 4 inclui uma grande diversidade de rochas pertencentes ao Paleozóico superior (Oliveira, 1984). Estas rochas paleozóicas dispõem-se em afloramentos alinhados segundo NW-SE e N-S que localmente são deslocados por falhas com direcção NE-SW, NNE-SSW, NNW-SSE e E-W (Fig. 4). As rochas paleozóicas são de natureza sedimentar e vulcânica, e estão afectadas por deformação (i.e. dobras e falhas) e por condições de baixo grau de metamorfismo (i.e. fácies dos xistos verdes). Na base da sequência estratigráfica do Paleozóico surge o Complexo Vulcano-Silicioso do Cercal (Carvalho, 1976; Oliveira, 1984). Este complexo é constituído principalmente por rochas meta-vulcânicas félsicas (meta-riólitos), e também básicas (meta-andesitos e meta-basaltos) em menor volume, que estão associadas a meta-pelitos e meta-psamitos da Formação de São Luís, onde foram encontrados fósseis de braquiópodes do Devónico superior (Fameniano; c. 358-372 Ma; Carvalho, 1976; Oliveira, 1984). Os meta-pelitos e meta-psamitos estão intercalados por meta-tufitos, quartzitos e jaspes. A topo das rochas devónicas do Complexo Vulcano-Silicioso do Cercal surge a Formação de Mira que pertence ao Grupo do Flysch do Baixo Alentejo (Oliveira, 1984). Nas rochas meta-sedimentares da Formação de Mira foram encontrados fósseis de goniatites e amonites do Carbónico (c. 331-315 Ma; Serpukhoviano e Bashkiriano). O limite geológico entre o Complexo Vulcano-Silicioso do Cercal e a Formação de Mira parece assinalar uma lacuna estratigráfica, que no mínimo representará um intervalo de tempo de aproximadamente 30 milhões de anos a separar a actividade vulcânica devónica da sedimentação siliciclástica turbidítica do Carbónico.

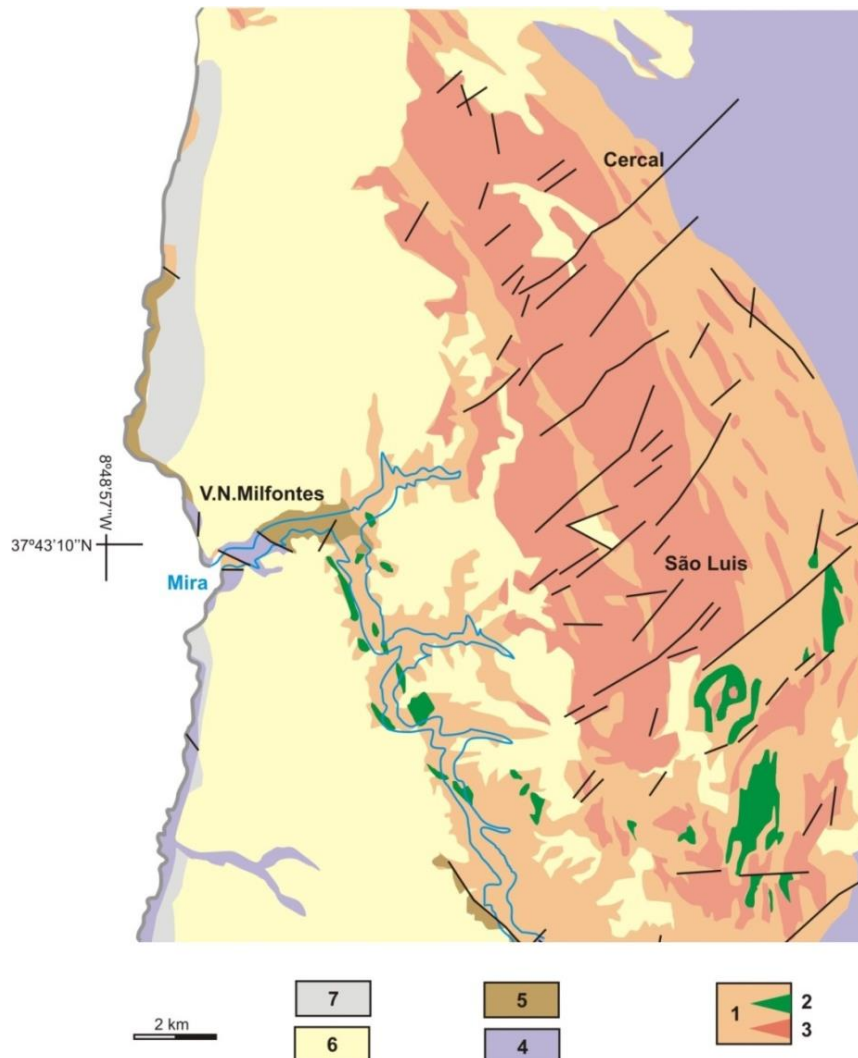


Figura 4- Mapa geológico simplificado da área de estudo de Vila Nova de Milfontes-Cercal- São Luís (adaptado de Oliveira, 1984); Complexo Vulcano-Silicioso (Devónico superior): 1- Formação de São Luís; 2- rochas máficas; 3- rochas félsicas; Grupo de Flysch do Baixo Alentejo (Carbónico): 4- Formação de Mira; 5- Formação da Brejeira; Depósitos de Cobertura (Plio-Quaternário): 6- Areias, arenitos e cascalheiras do Plio-Pleistocénico; 7- Areias de duna de praia, aluviões do Holocénico.

A Formação de Mira é constituída essencialmente por meta-pelitos e inclui raros meta-conglomerados que incluem clastos de rochas vulcânicas, provavelmente provenientes do Complexo Vulcano-Silicioso do Cercal (Kleyn, 1960).

Por último, as rochas sedimentares paleozóicas mais recentes que estão em continuidade estratigráfica com as da Formação de Mira são quartzitos, meta-pelitos e meta-grauvaques da Formação da Brejeira. Estas rochas meta-sedimentares representam o topo do Grupo do Flysch do Baixo Alentejo, e contêm fósseis de amonóides do Carbónico superior (Bashkiriano; Oliveira, 1984).

A estratigrafia da região mostra que, cerca de 300 milhões de anos depois, uma sucessão dos processos tectono-eustáticos que estiveram activos no Plio-Quaternário provocaram uma regressão generalizada (Feio, 1951) e o desenvolvimento de bacias do tipo “graben”, controladas por abatimento de blocos de crosta limitados por falhas (Cabral, 1995; Ramos Pereira, 2004). Estes processos terão sido a principal causa para a formação do modelado actual do relevo que é observado nesta região, onde a planície litoral antiga foi progressivamente talhada pelo encaixe do Rio Mira (Ramos Pereira, 1990; Ramos Pereira e Ramos, 2020).

Há aproximadamente 5 Ma (Pliocénico), o preenchimento sedimentar da planície litoral antiga iniciou-se com depósitos siliciclásticos (arenitos, argilitos e conglomerados) que cobrem, através de uma discordância angular, as rochas metamórficas paleozóicas da Zona Sul-Portuguesa (Fig. 5).

As rochas sedimentares mais antigas da planície litoral antiga são areias e cascalheiras marinhas que pertencem à Formação Vermelha (Ramos Pereira, 1990) (Fig. 6). Segundo esta autora, eventos tectónicos posteriores à deposição da Formação Vermelha terão provocado o movimento de blocos limitados por falhas (Fig. 5).

De acordo com o mesmo modelo estratigráfico evolutivo desta região (Ramos Pereira, 1990), os sedimentos resultantes da erosão da Serra do Cercal foram transportados ao longo da encosta deste relevo montanhoso e formaram depósitos coluviais e aluvionares (i.e. Leques Aluvionares inferiores) que assentaram sobre a Formação Vermelha, e/ou, localmente, directamente sobre as rochas paleozóicas. Mais tarde, durante o Plio-Pleistocénico, a sedimentação marinha (Formação de Aivados-Buganheira) terá coexistido com a sedimentação fluvial e/ou aluvionar (i.e. Leques Aluvionares superiores; Ramos Pereira, 1990) (Fig. 6), tal como foi igualmente descrito no registo estratigráfico Plio-Pleistocénico da área de Grândola-Melides (Oliveira, 1984; Ressurreição et al., 2014). Na planície litoral plio-pleistocénica, o sistema fluvial

encontraria o domínio marinho ocorrendo sedimentação ora marinha ora continental, condicionada pelo equilíbrio entre factores como as oscilações eustáticas e a capacidade de transporte e sedimentação dos rios e ribeiras (Ressurreição, 2018), e a tectónica que condicionaria o rejuvenescimento do relevo (Ramos Pereira, 2005).

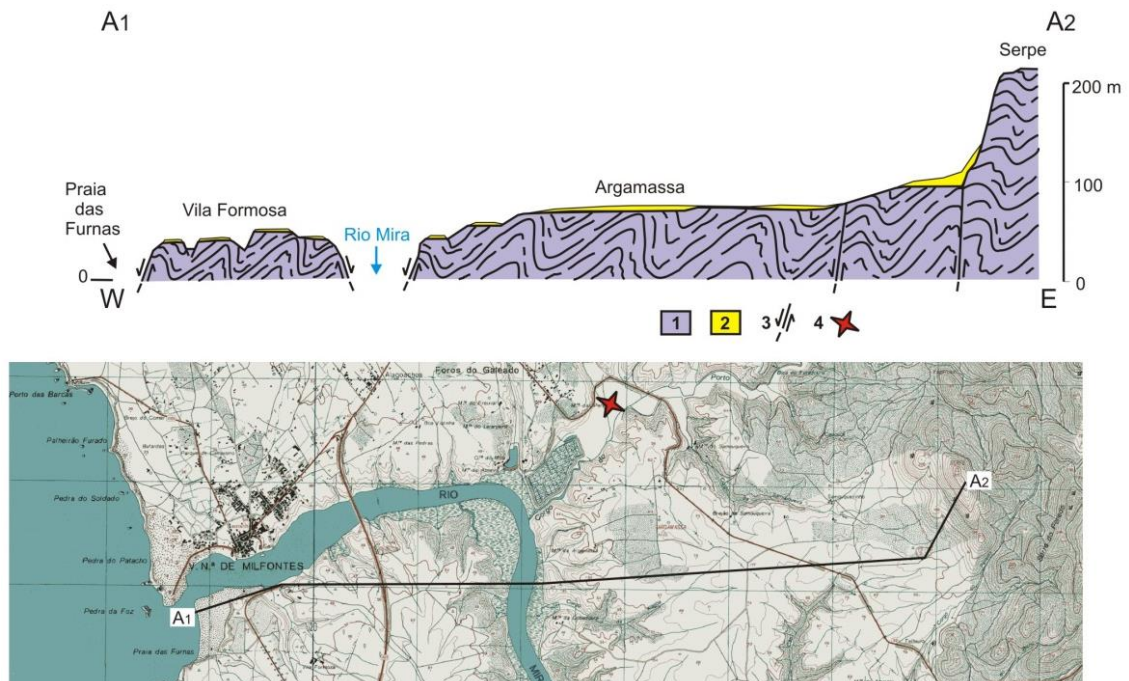


Figura 5- A arriba fóssil, a planície litoral escalonada por efeito da tectónica, o Rio Mira e a Serra do Cercal. Corte topográfico e geológico esquemático desde a Praia das Furnas (A1; foz do Rio Mira) até ao marco geodésico Serpes (Serra do Cercal) (adaptado de Ramos-Pereira, 1990); 1- Rochas paleozóicas meta-sedimentares com dobramento; 2- Rochas sedimentares plio-pleistocénicas; 3- Falhas prováveis; 4- Sondagem (Alday et al., 2006); Localização do corte A1-A2 no excerto da Carta Militar de Portugal, folha 544-Vila Nova de Milfontes (Odemira), escala 1:25000 (Serviço Cartográfico do Exército).

Perí./Sist.	Época/ Série	Idade/ Andar	Ma	Alentejo Litoral: sector Melides-Vila Nova de Milfontes		
Quaternário	Holocénico			Aluviões, areias de praia e duna	Aluviões, areias de praia e duna	Aluviões, areias de praia e duna
	Pleistocénico	Superior	0.0117	Dunas fossilizadas	Terraços fluviais, depósitos de vertente	Duna consolidada de Aivados
		Médio	0.126	Terraços marinhos e fluviais		Duna consolidada do Malhão
		Calabrianiano	0.781			Fm. Aivados-Buganheira
		Gelasiano	1.806	Fm. Vale Figueira	Areias, arenitos, e cascalheiras do litoral do baixo Alentejo e do Vale do Sado	
	Pliocénico	Placenciano	2.588			Leques Aluvionares
		Zancleano	3.600	Fm. Galé	Argilas, margas c/ concreções calcárias, calcários c/ sílex, areias e cascalheiras	Fm. Vermelha
			5.333			
				Ressurreição et al. (2014); Ressurreição (2018)	Oliveira (1984)	Ramos-Pereira (1990; 2005)

Figura 6- Representação esquemática das unidades estratigráficas plio-quaternárias reconhecidas na área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís (Adaptado de Ramos Pereira, 1990, 2005; Oliveira, 1984; Ressurreição, 2018).

O registo estratigráfico mais recente revela que no final do Pleistocénico e no início do Holocénico se desenvolveram depósitos eólicos, designados por dunas consolidadas do Malhão e de Aivados (Ramos Pereira, 1990) (Fig.6). A evolução holocénica posterior é assinalada pelo entalhe actual da rede hidrográfica, pela formação de aluviões, dunas e praias de areia e de cascalho (Ramos Pereira, 2004).

Através da realização de uma sondagem na ribeira do Corgo do Porto da Mó (Fig. 7), foi possível analisar em detalhe o conteúdo fossilífero do preenchimento sedimentar Holocénico deste afluente do Rio Mira. Os resultados de geocronologia obtidos, permitiram constatar que os depósitos fluviais mais antigos intersectados por esta sondagem têm cerca de 10.150 anos cal. BP (Alday et al., 2006).

Esta idade obtida por Alday et al. (2006) é um pouco mais recente da obtida nos sedimentos do Rio Mira, datados aos c. 11141 anos cal. BP (Boski et al., 2013), que foram amostrados numa sondagem realizada mais a montante, num vale fluvial da vertente oeste da Serra de Monchique, indicando as primeiras etapas de deposição fluvial no início do Holocénico. As características sedimentológicas e paleontológicas dos sedimentos holocénicos da ribeira do Corgo do Porto da Mó (Fig. 7), mostram ainda que o ambiente sedimentar fluvial inicial deu lugar a condições de sedimentação em ambiente estuarino com maior ou menor influência marinha (Alday et al., 2006).

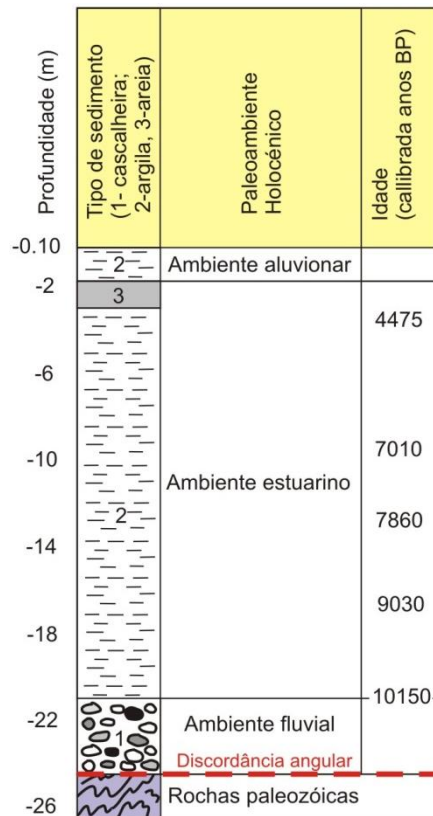


Figura 7- Representação esquemática das unidades estratigráficas holocénicas (tipo de rocha sedimentar, ambiente sedimentar e datações com Carbono-14) da sondagem realizada na ribeira do Corgo do Porto da Mó, afluente do Rio Mira na área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís (Adaptado de Alday et al., 2006).

Apesar de ser admitido que o entalhe do Rio Mira se terá iniciado no Pleistocénico (Ramos Pereira, 1990), até hoje, e com base na informação paleontológica e geocronológica disponível, os sedimentos mais antigos encontrados discordantes sobre as rochas paleozóicas são de idade holocénica, não permitindo corroborar esta hipótese.

I.2. Terminologia e conceitos

I.2.1- Descrição do modelo de ambiente sedimentar estuarino

Os estuários são ambientes sedimentares de transição que se encontram na interface entre o ambiente terrestre e o ambiente marinho. Há semelhança do que acontece com os restantes ambientes sedimentares que cobrem a superfície da Terra, podemos considerar vários sub-ambientes sedimentares caracterizados por diferentes unidades morfossedimentares (UMFS) no modelo de sedimentação estuarina. A compreensão dos processos de formação e de desenvolvimento das UMFS é fundamental para caracterizar os principais mecanismos de evolução morfossedimentar dos estuários a diferentes escalas temporais (diária, mensal, anual, etc). O estudo da dinâmica sedimentar estuarina só é possível de concretizar com sucesso através da análise detalhada dos principais processos de sedimentação que aí ocorrem e que estão intrinsecamente relacionados com: i) o tipo de fornecimento sedimentar (i.e. sedimentos de origem marinha e/ou continental), e ii) os distintos padrões de circulação de massas de água, que podem apresentar diferentes níveis de salinidade, e que estão fortemente condicionados pelo ciclo de maré, considerando a propagação da onda de maré que está condicionada pela batimetria das zonas intertidais.

A Figura 8 ilustra um modelo da distribuição dos distintos sub-ambientes sedimentares que podem ser observados num estuário mesotidal (i.e. amplitude da maré entre 2 e 4 m), entre a foz e o limite máximo da maré dinâmica. Os sedimentos arenosos, que constituem as UMFS que só apresentam cobertura vegetal nas zonas que estão permanentemente emersas (e.g. dunas e limite superior das praias estuarinas), predominam junto à foz. Por essa razão, as UMFS do “complexo da foz” e da “baía”, aqui classificadas como barras arenosas, praias estuarinas e dunas, são formadas maioritariamente por sedimentos arenosos de origem marinha. Na zona intertidal do estuário os sedimentos arenosos de origem marinha estão sujeitos ao transporte contínuo pela acção das correntes de maré e das ondas (i.e. factores hidrodinâmicos). A montante da baía, as UMFS caracterizam-se pela predominância de sedimentos de granulometria mais fina (silte e argila) comparativamente com os sedimentos de granulometria mais

grosseira (areia) que abundam a jusante. Estes sedimentos finos são abundantes nas UMFS classificadas como sapal (alto, médio e baixo) e no raso de maré. No entanto, convém salientar que o raso de maré pode apresentar uma componente arenosa importante no caso em que contacta com o canal de escoamento principal do rio.

O modelo da distribuição das UMFS num estuário, apresentada na Figura 8, reflete os pressupostos da definição de Dalrymple et al. (1992), que embora não seja consensual é um importante ponto de partida para quem se quer dedicar a estudar o tema. Dalrymple et al. (1992) consideram que: “O estuário é a parte terminal, na direcção do mar, de um sistema de vale inundado que recebe sedimentos de duas fontes, fluvial e marinha, e que contém fácies influenciadas pela maré, ondas e processos fluviais. O estuário é considerado o troço do rio que se localiza entre o limite a montante que é representado por fácies tidais e o limite a jusante de fácies costeiras que coincide com a sua foz”.

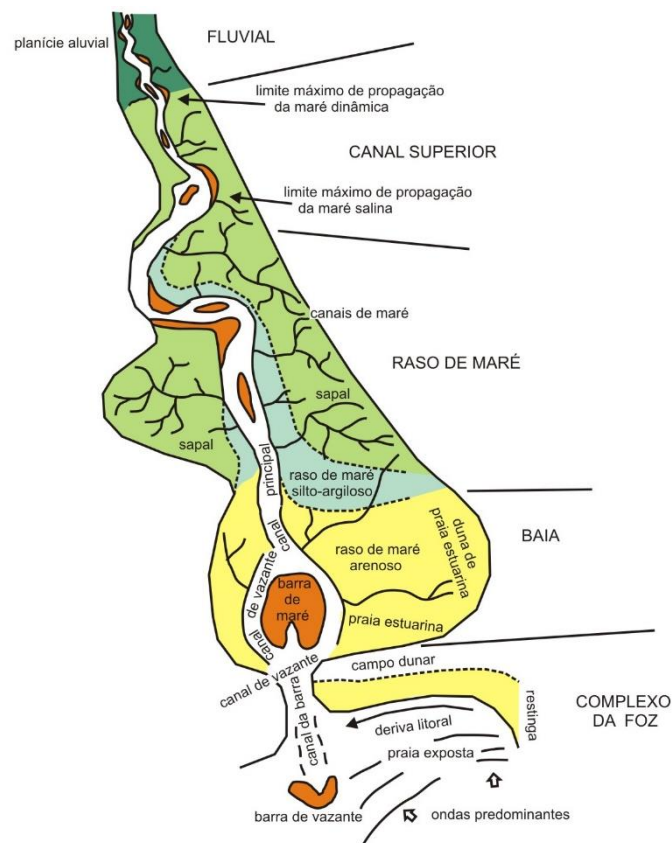


Figura 8- Esquema ilustrativo dos diferentes sub-ambientes do sector terminal de um estuário (adaptado de Flor-Blanco e Flor, 2019).

I.2.2- Escalas temporal e espacial dos processos sedimentares no ambiente sedimentar estuarino

No sapal e no raso de maré, verifica-se que o tipo e a distribuição da vegetação que as cobre podem condicionar a formação e a manutenção destas UMFS, revelando uma estreita interacção entre a dinâmica estuarina e os processos biofísicos.

A Figura 9 ilustra o enquadramento dos processos biofísicos na complexidade da actividade dos processos de dinâmica sedimentar estuarina. Nesta ilustração são realçadas as “condições fronteira” entre diferentes coberturas vegetais que contribuem para definir os limites físicos entre o ambiente sedimentar fluvial, estuarino e marinho que constam da Figura 8. Dado o facto de ser muitas vezes complexa a definição destes diferentes limites adopta-se pela utilização do termo “sistema estuarino”.

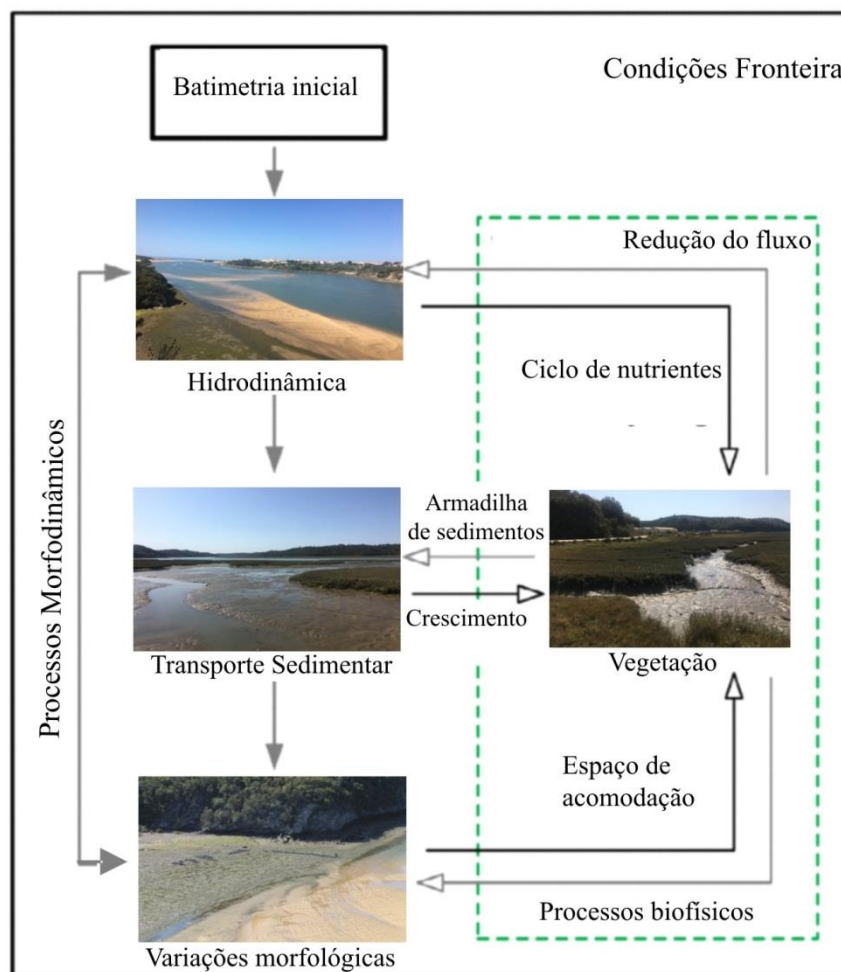
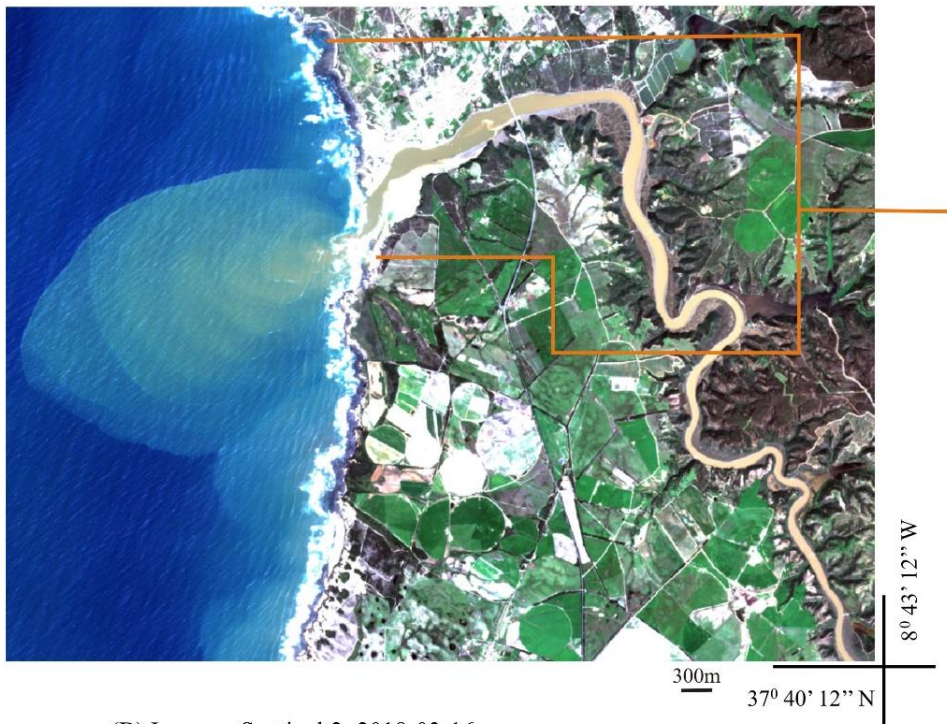


Figura 9- Esquema ilustrativo da morfodinâmica sedimentar do ambiente sedimentar estuarino, incluindo os processos biofísicos (adaptado de Zhou et al., 2015).

Num estuário a atividade biológica é determinante para a retenção de sedimentos, isto porque as plantas através das suas raízes, caules e folhas são responsáveis pela diminuição da velocidade de escoamento da água (e.g variações diárias do nível de maré), propiciando as condições necessárias à deposição de siltes e de argilas. Os sedimentos finos, provenientes da bacia hidrográfica do rio são transportados em suspensão na coluna de água em direcção ao mar, principalmente após chuvas intensas (e.g. Março 2018; Fig. 9). A actividade biológica da vegetação halófita (i.e. plantas que são tolerantes à salinidade) nos sapais, conjuntamente com a floculação salina e a biofloculação, fazem parte do sistema estuarino natural que retém no estuário os sedimentos de origem continental. A floculação salina ocorre quando na presença de sais, as cargas das partículas de argila são neutralizadas formando-se flocos, cujo tamanho e velocidade de sedimentação é maior que as das partículas iniciais. A biofloculação está relacionada com a presença nos estuários de organismos que ingerem partículas de silte e de argila e que as excretam sob a forma de “*pellets*” fecais, e também, de algas que segregam uma mucilagem que contribui para a formação de flocos de composição mista (orgânica e inorgânica). O processo natural de retenção de sedimentos finos no estuário evita que grande parte deles sejam transportados para o mar através das plumas túrbidas. A retenção sedimentar no estuário é condicionada pela actuação de factores hidrodinâmicos (Fig. 9), como a maré e as variações do caudal do rio. No episódio de cheias que ocorreu no Rio Mira e que foi registado pelas imagens Sentinel-2 (S2) nos dias 16 e 21 de Março (Fig. 10), pode observar-se uma grande quantidade de sedimentos em suspensão na coluna de água de cor acastanhada. Nestas imagens de satélite destaca-se a formação de uma pluma túrbida de grande extensão em direcção ao mar, em período de Baixa-Mar (BM; nível de 0.7m) (Fig. 10A). Também é de salientar, o registo da entrada da onda de maré (água salgada) no interior do estuário durante a Preia-Mar (PM; nível de 3.2m), em 2018-03-16 (Fig.10B).

(A) Pluma túrbida. Imagem Sentinel 2: 2018-03-21



(B) Imagem Sentinel 2: 2018-03-16

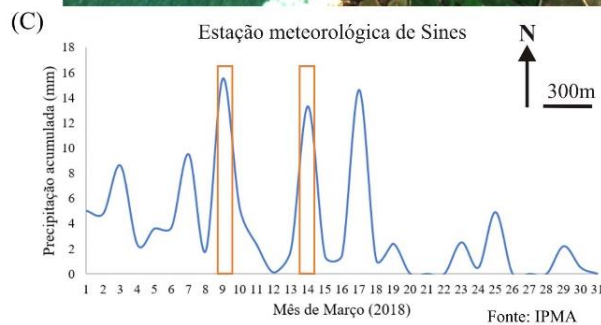
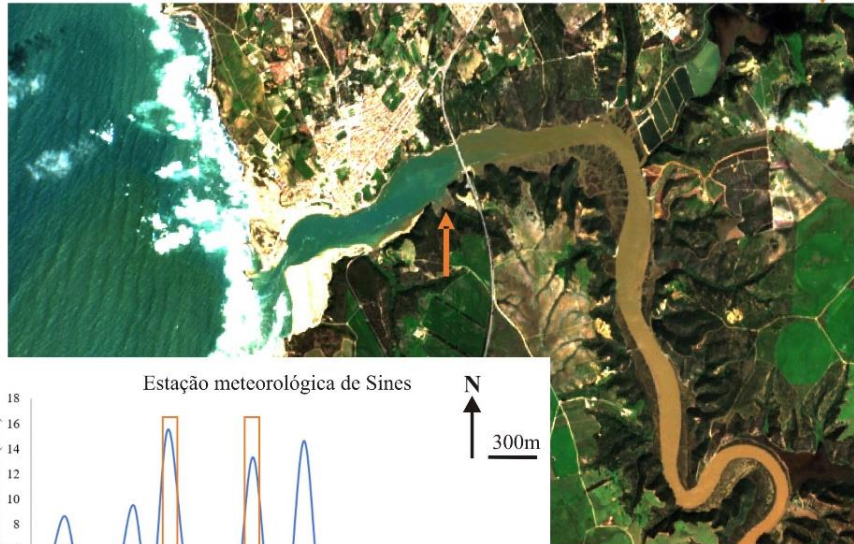


Figura 10- (A)- Pluma túrbida do Rio Mira, 2018-03-21; (B)- Entrada de água salgada para o interior do estuário com a progressão da maré, 2018-03-16. Imagens Sentinel-2 (RGB); (C)- Registo da precipitação acumulada (mm) na estação meteorológica de Sines (Fonte: IPMA).

Quando se dá a propagação da onda de maré para o interior do estuário, ocorre a mistura parcial de massas de água com salinidade distintas, facilitando a floculação salina das partículas argilosas que constituem grande parte da carga sedimentar fluvial que viaja em suspensão na coluna de água. Para além disso, durante a PM, a água do rio que transporta um grande volume de sedimentos finos tende a atingir os níveis mais elevados do alto sapal. O alto sapal, por estar coberto por vegetação halófita, reúne as condições ideais para reter os sedimentos finos que até aí são transportados durante o ciclo de maré. Os diferentes tipos de transporte de sedimentos na coluna de água e a eficácia das armadilhas de retenção são essenciais à manutenção do sapal e do raso de maré, essencialmente constituídos por sedimentos finos, com dimensão inferior a $63\ \mu\text{m}$ (i.e. partículas com 0.001 a 0.02 mm de diâmetro). No entanto, convém ter presente que é um processo de sedimentação lento que pode demorar décadas a acumular quantidades significativas de sedimento, quando comparado com as alterações morfológicas rápidas durante um ciclo de maré (i.e. algumas horas) pode induzir na morfologia de uma barra arenosa junto à foz do rio, tal como é descrito no Cap.III.

O espaço de acomodação é outro factor que pode condicionar a formação e desenvolvimento de UMFS num estuário (Fig. 9). As características do espaço de acomodação onde se depositam os sedimentos dependem da Geomorfologia e da Geologia da região onde o estuário se enquadra (§ cap.I), características que condicionam a configuração original do vale do rio. Ao longo do tempo, o vale do rio vai sendo tendencialmente preenchido por sedimentos diminuindo o espaço de acomodação disponível. Se for o caso de um sistema estuarino que está em equilíbrio com os agentes hidrodinâmicos (i.e. a taxa deposição sedimentar \approx erosão), o espaço de acomodação disponível na zona intertidal tem a tendência para se manter constante mantendo sem grandes variações a distribuição e extensão das diferentes UMFS. Por exemplo, o espaço de acomodação de um estuário pode aumentar se a taxa de sedimentação no sapal for de tal forma eficaz que promova o aumento da sua altimetria.

I.2.3- Principais unidades morfossedimentares (UMFS)

O ambiente sedimentar estuarino pode ser descrito considerando perspectivas distintas que podem realçar critérios geológicos, biológicos ou biofísicos, representando concepções complementares e não antagónicas. A parte terminal do estuário do Rio Mira foi acima descrita tendo em consideração o seu enquadramento geológico e geomorfológico (Cap.I), apontando para a classificação de estuário de plano aluvial, cujo preenchimento sedimentar provém tanto do continente como do oceano. Por outro lado, como o estuário do Rio Mira está sujeito a um regime de maré mesotidal (amplitude da maré entre 2 e 4 m; Davies 1964 *in* Masselink e Hughes, 2003) também pode ser classificado como sendo um estuário mesotidal. Por último, se considerarmos a salinidade das massas de água do estuário este pode ser classificado como positivo (parcialmente misturado) ou normal (bem misturado). Esta classificação baseada na salinidade da coluna de água do rio depende da estação do ano. A intrusão salina (i.e. água do oceano transportada pela onda de maré) tende a diminuir gradualmente para montante, à medida que o transporte da água doce proveniente do continente é mais efectivo por efeito do aumento da mistura das massas de água ou da precipitação, que é geralmente característica das estações do ano mais chuvosas. O ciclo de “Marés Mortas” e de “Maré Vivas” também pode ter influência no padrão da intrusão salina, tal como se verifica para o sector do estuário do Rio Mira compreendido entre a foz e o Moinho da Asneira. Na PM de “Marés Vivas” o estuário pode ser de tal forma inundado por água de elevada salinidade que se verifica que a interface entre massas de água de diferentes densidades (i.e. “*plunge point*”) pode ser deslocada para montante. Nesta situação a estratificação tende a diminuir no canal mais profundo e a deslocação de água salina poderá estender-se até ao fundo do canal de escoamento (e.g. Blanton et al., 2000). Desta forma, não ocorre estagnação da água perto do fundo do canal, e a água salgada atinge as zonas estuarinas localizadas mais a montante.

As diferentes perspectivas de classificação de estuários acima descritas traduzem a complexidade da descrição do sistema estuarino e da sua dinâmica sedimentar (§I.2.2). Neste contexto, e considerando que o presente estudo usa informação geográfica para caracterizar o padrão de distribuição das diferentes UMFS da parte terminal do estuário

do Rio Mira, tendo por base dados ópticos de Detecção Remota (Sentinel-2), considera-se essencial descrever cada uma delas de forma sucinta. A descrição das UMFS apresentada de seguida é adaptada de Allen (2000). A Figura 11 ilustra as principais UMFS que foram definidas para a parte terminal do estuário do Rio Mira tendo por base: i) a cobertura sedimentar: cascalho, areia, silte e argila; e também inclui a litologia dominante nas margens do rio; e ii) a presença ou ausência de cobertura vegetal (plantas halófitas ou “ervas marinhas”, e.g. *Zostera spp.* e algas).

A morfologia e as principais características sedimentológicas de cada das UMFS reflectem o processo de sedimentação e o predomínio relativo entre cada um dos agentes hidrodinâmicos. Tratando-se de um estuário mesotidal onde a maré influencia decisivamente a dinâmica sedimentar, entendeu-se conferir uma particular importância nesta tese à zona intertidal do Rio Mira onde se incluem as UMFS: sapal (alto, médio e baixo), raso de maré, praia estuarina, parte das barras arenosas e a margem do rio que é maioritariamente formada por cascalho e/ou rocha consolidada (metagrauvaque, quartzito). As restantes UMFS que foram definidas fora da zona intertidal, e acima da influência da amplitude máxima da onda da maré durante as “Marés Vivas” são: a duna, e o limite superior da zona emersa da praia estuarina (Fig. 11).

A influência do ciclo de maré nos processos de sedimentação é também evidente quando se descreve a posição relativa de cada UMFS na zona intertidal que no *sensu lato* é equivalente às margens do estuário. Na Figura 12 apresenta-se um padrão simplificado da cobertura sedimentar das diferentes UMFS, onde é possível verificar que existe um aumento da dimensão do sedimento entre o sapal da zona supratidal (sapal) e o raso de maré.

A zona supratidal está emersa durante grande parte do tempo de duração do ciclo de maré, com a excepção do nível de PM de Marés Vivas, período durante o qual a amplitude da maré é suficientemente elevada para cobrir o sapal. A zona que se situa entre o nível da maré máxima e mínima é designada por zona intertidal (*sensu stricto*) pois está dependente da amplitude do ciclo de maré. Por sua vez, a zona subtidal é aquela que se encontra quase sempre imersa, sendo a zona mais energética porque sofre o efeito das correntes de enchente e de vazante. No caso em que as zonas supratidais e intertidais são

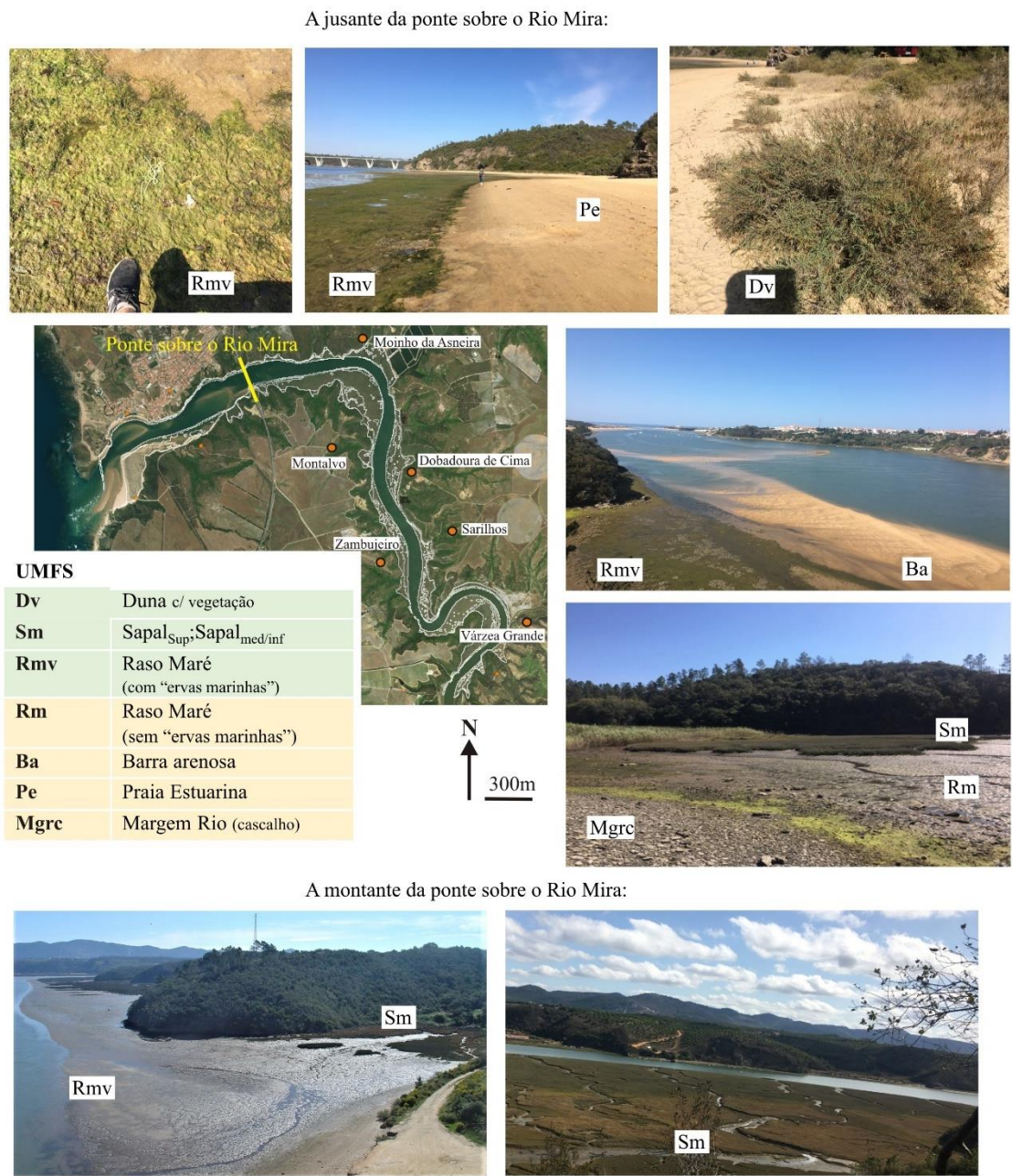


Figura 11- Principais unidades morfossedimentares (UMFS) da parte terminal do estuário do Rio Mira.

suficientemente extensas, estas podem ser drenadas por uma rede de canais de maré que se alimentam do canal estuarino principal (Masselink e Hughes, 2003).

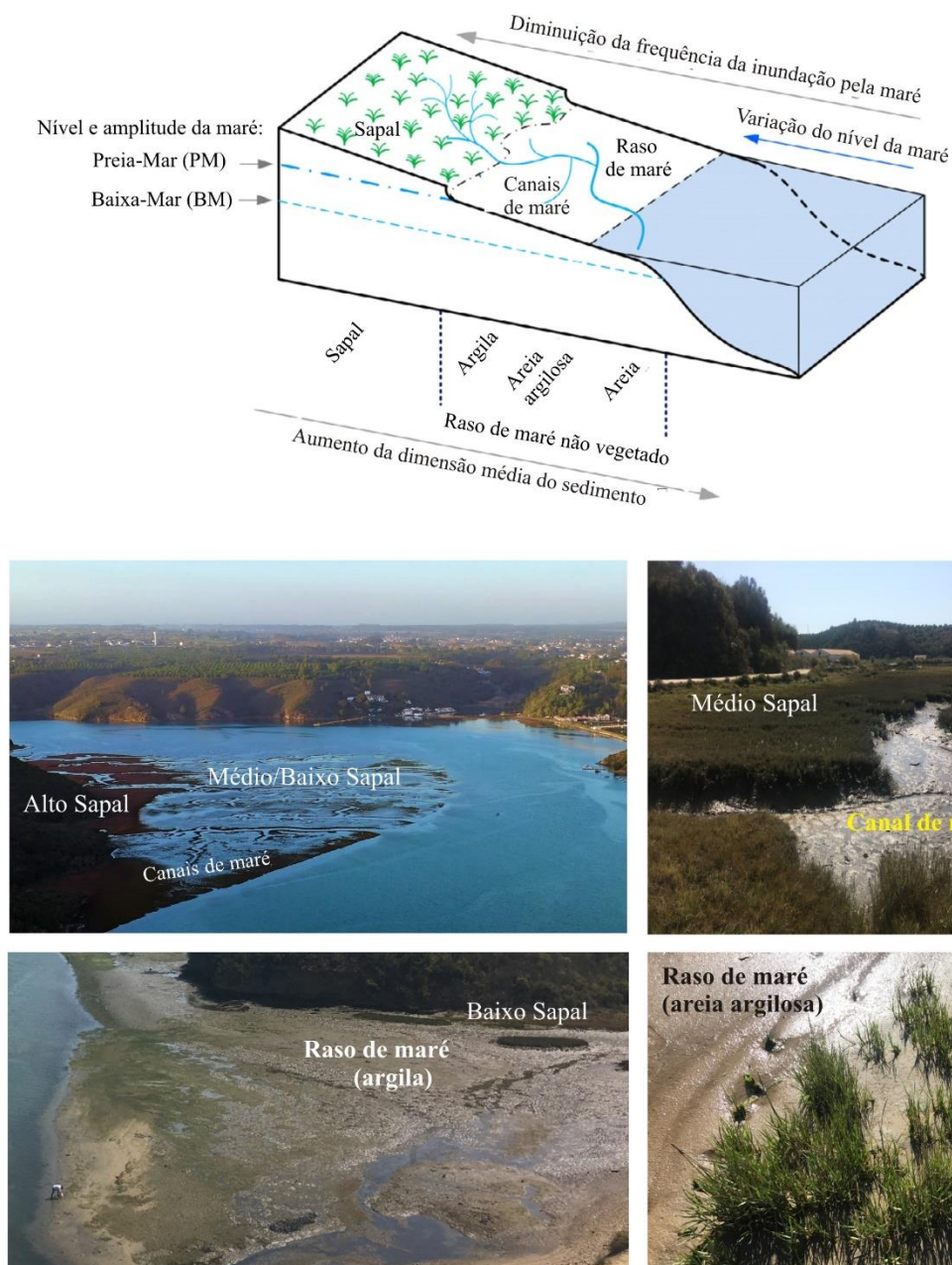


Figura 12- Posição relativa das unidades morfossedimentares (UMFS) raso de maré e sapal na zona intertidal, considerando o ciclo de maré (adaptado de Zhou et al., 2015).

Nesta dissertação de Mestrado optou-se pela utilização do termo UMFS sempre que se pretende realçar os processos morfossedimentares que ocorrem no estuário, e como é que estes condicionam os padrões de sedimentação observados. Por outro lado, quando se desenvolve a classificação da zona intertidal, tendo por base o processamento de dados ópticos Sentinel-2, é usado o termo “classe”. A vectorização do *raster* final de classificação obtida, por métodos de processamento e classificação de imagens de satélite (e.g. “*K-Means*”), permite definir diferentes polígonos e reconhecer diferentes classes em mapas temáticos resultantes da classificação (§ II.1.4). Neste tipo de mapas é possível fazer a correspondência entre as classes identificadas pelo processamento e classificação das imagens de satélite e cada uma das UMFS (“*Land Cover*”). A Tabela 1 resume as principais características das classes ilustradas na Fig.11 e 12.

UMFS/Classe	Principais características
Duna (D)	O limite superior da praia estuarina pode ser limitado por dunas incipientes, formadas por areias finas a médias, parcialmente cobertas por vegetação.
Praia estuarina (PE)	As praias estuarinas são maioritariamente constituídas por areia, o seu limite superior pode ser contíguo a uma duna incipiente. O seu limite inferior pode coincidir com o canal estuarino principal ou com o raso de maré parcialmente coberto por areia e/ou “ervas marinhas”.
Sapal (Sm) (alto; médio; baixo)	Áreas cobertas por vegetação halófitas, cuja classificação detalhada depende da vegetação que a coloniza e da sua altimetria relativamente à amplitude da maré. Dependendo da sua extensão e estado de conservação pode apresentar canais de maré. É maioritariamente composto por silte e por argila. No seu limite inferior estende-se o raso de maré.
Raso de Maré (RM)	Superfície de baixo declive formada por sedimentos silto-argilosos, podendo apresentar alguma areia e estar total ou parcialmente coberta por “ervas marinhas” (e.g. <i>Zostera spp.</i> e algas).
Barra Arenosa (BA)	Barra de maré de morfologia linear ou em forma de “U”, presente no domínio subtidal e por isso apenas parcialmente emersa durante a baixa-mar e formada por areia.
Margem do Rio (MgC)	Margem do rio formada por sedimentos grosseiros (e.g. cascalho maioritariamente constituídos por clastos de metagrauwaque e de quartzito) e onde não ocorre sedimentação significativa de areia ou de sedimentos silto-argilosos. O seu limite superior é marcado pela presença de vegetação terrestre e/ou por rocha consolidada que forma o talvegue do rio.

Tabela 1- Breve descrição das UMFS consideradas na descrição do sector terminal do estuário do Rio Mira.

Capítulo II - Métodos de Detecção Remota aplicados ao estudo de zonas estuarinas

II.1- Estado da arte

A população mundial está muito concentrada nas zonas costeiras sabendo-se que são regiões fortemente ameaçadas pela subida generalizada do nível do mar como efeito das alterações climáticas. A preservação dos sistemas estuarinos, que apresentam uma particular e complexa dinâmica sedimentar e uma grande riqueza biofísica, é essencial para desenvolver políticas de desenvolvimento que estejam direccionadas à minimização de problemas sociais e económicos graves, actuais e futuros, que a sua destruição acarreta. A consciencialização mundial sobre a importância da preservação das zonas costeiras tem vindo a aumentar e tem sido traduzida: i) pela formalização de convenções internacionais que visam, por exemplo, a protecção e preservação de zonas húmidas (e.g. Convenção de Ramsar; “*EU Habitats Directive*”, Council of the European Union, 1992), e ii) através da difusão do conceito de “serviço dos ecossistemas” que alerta para a elevada biodiversidade e produtividade dos ecossistemas aí existentes. A nível nacional, este conceito encontra-se expresso de modo muito evidente no Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território (PNPOT *in* DGT, 2018), fazendo parte dos objectivos principais que nele estão consagrados.

A descrição das zonas costeiras varia em função dos condicionamentos geológicos e geomorfológicos que caracterizam uma determinada região, e em particular, consoante os modelos que definem os ambientes sedimentares de transição (i.e. transição entre o continente e o oceano), como sejam: os estuários, as lagoas costeiras, as ilhas barreira, os deltas, etc. O modelo de sedimentação estuarina aplica-se à zona costeira que se designa por “zonas húmidas” (“*Wetland*”), e que se estende principalmente pela zona intertidal. As zonas húmidas podem incluir sapais, mangais, turfeiras, ou reservatórios de água, naturais ou artificiais, permanentes ou temporários, com água parada ou corrente, doce, salobra ou salgada, incluindo áreas de água marinha cuja profundidade na BM não exceda os 6 m. Nalguns casos, as zonas húmidas também podem incluir a zona ribeirinha e

costeira que lhe é adjacente, e ilhas ou áreas de água marinha cuja profundidade na BM possa exceder os 6 m e que possam existir no seu interior (Internacional Ramsar Bureau, 1998, *in* Tiner, 2014).

A dinâmica sedimentar do ambiente estuarino é marcada por escalas temporais distintas, que são também condicionadas por factores biológicos e que não se limitam à presença de cobertura vegetal. Assim sendo, a protecção e conservação dos estuários implica a implementação de normas de preservação baseadas em modelos pluridisciplinares. O ponto de partida para a definição das estratégias de preservação e de gestão a implementar passam necessariamente pela inventariação prévia do estado actual das zonas húmidas. Neste contexto, a informação obtida através do processamento de dados de Detecção Remota é imprescindível. De facto, a imagem digital e os sistemas de informação geográfica são duas ferramentas, agora de fácil acesso, que alteraram o mapeamento tradicional combinando, num único passo, a interpretação e as operações cartográficas de mapeamento das zonas húmidas (Tiner, 2014). Segundo esta abordagem, o intérprete passa a ser simultaneamente intérprete e cartógrafo (i.e. analista da imagem) de informação adquirida com Detecção Remota, acompanhando a melhoria da resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal dos sensores, bem como, o aperfeiçoamento dos processos analíticos necessários para interpretar os dados (Tiner et al., 2014).

O processamento de dados de satélite para estudar zonas húmidas, tem evoluído de forma muito significativa, mas o rápido avanço tecnológico que tem permitido elaborar mapas com informação de zonas húmidas cada vez mais fiáveis e com uma resolução espacial maior, obriga a uma actualização permanente das metodologias a aplicar. Ainda assim, a natureza dinâmica das zonas húmidas (i.e. humidade efémera), a sua biodiversidade (i.e. variações da estrutura da planta e fenologia), a multiplicidade de locais que ocupam na paisagem, e a proporção variável que ocupam na paisagem, continuam a desafiar a capacidade dos sensores existentes, quer sejam aero-transportados ou instalados em satélites (Lang et al. 2014).

O tipo de dados de satélite aplicados ao estudo de zonas húmidas é muito diversificado, dependendo das características dos sensores usados na sua aquisição, mas também do “*software*” e “*hardware*” requerido para o seu processamento em tempo útil (Tiner et al., 2014). Por exemplo, a grande quantidade de dados recolhidos pelo programa

Landsat reuniu um volume de informação conhecido por “*Geo Big Data*” cujo processamento não era acessível aos PCs convencionais (Shelestov, 2017 in Mahdianpari et al 2018). Actualmente, parte deste problema foi solucionado, através da existência de plataformas de acesso aberto de dados, como é exemplo o “*Google Earth Engine*” (GEE), que proporcionam o seu tratamento. O acesso a séries longas de dados de satélite permite a construção de mapas multitemporais de zonas húmidas que podem ser acedidos através de *Apps* desenvolvidas para o efeito. É o caso da *app*: “*Global Intertidal Change-Mapping the Global Distribution and Trajectory of Tidal Flat Ecosystems*” (<http://intertidal.app>), desenvolvida por Murray et al. (2019). Esta aplicação que é baseada em dados Landsat 4, 5, 7 e 8 permite aceder a padrões de evolução de zonas húmidas à escala global, e foi essencial para estabelecer que a área intertidal global diminuiu 16% em trinta e dois anos, no período de tempo que decorreu entre 1984 e 2016. As zonas intertidais que estão associadas a litorais arenosos também foram caracterizadas a nível global recorrendo a dados Landsat, e a uma metodologia que detectou variações da linha de costa para o mesmo período de tempo (Luijendijk et al., 2018). No entanto, importa referir que a escala e o detalhe do mapa de classificação final que foi elaborada com base nas imagens Landsat por Murray et al. (2019) e (Luijendijk et al. (2018) devem ser analisados com precaução. A título de exemplo, se analisarmos de modo crítico os resultados obtidos por Laengner et al. (2019, 2020) que usou uma sequência temporal de 24 anos de dados Landsat 5 TM (1986-2010) disponibilizados no GEE, com o objectivo de identificar variações espaço-temporais de zonas estuarinas extensas, podemos constatar que esta abordagem apresenta algumas limitações se for aplicada para caracterizar estuários de menores dimensões (ver discussão em § III.4).

A plataforma “*Google Earth Engine*” (GEE) também é útil porque permite o processamento de dados Sentinel do programa Copernicus da “*European Space Agency*” (ESA). Destacamos o facto dos dados Sentinel-1 (SAR- “*synthetic aperture radar*”) e Sentinel-2 (MSI- “*multi-spectral instrument*”; Level -1C) terem sido recentemente usados, recorrendo a esta plataforma, para proceder ao mapeamento multi-temporal de zonas húmidas na Island of Newfoundland no Canadá (Mahdianpari et al 2018).

A caracterização de zonas húmidas tem sido geralmente feita a partir de dados de satélites adquiridos pelo programa Landsat que foi iniciado no início da década de setenta

do século passado. Quanto aos dados Sentinel-2, estes têm sido adquiridos com satélites que foram lançados a 23 de Junho de 2015 (Sentinel-2A), e a 7 de Março de 2017 (Sentinel-2B) pela ESA, dispondo-se por enquanto de um catálogo de dados de apenas 5 anos. Esta limitação na resolução temporal é compensada pela resolução espacial de 10 e de 20 m e por um período de revisitação de 5 dias, fazendo com os dados Sentinel-2 estejam a ser utilizados com mais frequência para a descrição de zonas húmidas e/ou como complemento aos dados do programa Landsat.

A aplicação de dados Sentinel-1 e/ou Sentinel-2, conjuntamente com dados Landsat, ao estudo de zonas costeiras e/ou estuarinas, tem seguido abordagens distintas que se focaram principalmente: i) na detecção de forma automática do limite entre a água e as zonas intertidais (i.e. a “*waterline*”; e.g. Silio-Calzada et al., 2017; Pardo-Pascual et al., 2018); ii) na definição das principais classes de “*LandCover*” (LC) de zonas estuarinas e deltaicas (e.g. Projecto, FAST- “*Foreshore Assessment using Space Technology*”, 2014, 2017; Chatziantoniou et al., 2017; Calleja et al., 2017, 2019; Silio-Calzada et al., 2017; Mahdianpari et al., 2018; Kuenzer et al., 2019); iii) na monitorização de processos de realimentação de praias e na definição da linha de costa em litorais arenosos (e.g. Hagenaaars et al., 2018); iv) na descrição da batimetria de zonas costeiras (e.g. Caballero et al., 2019); e v) na detecção de habitats em zonas costeiras pouco profundas (e.g. Poursanidis et al., 2019).

Os dados de satélite que têm sido escolhidos para caracterização das zonas estuarinas em Portugal são do tipo: i) MERIS (“*MEdium Resolution Imaging Spectrometer*”) e IKONOS-2 (e.g. Teodoro e Gonçalves, 2011); ii) Landsat (e.g. Simas et al., 2001; Amorim, 2015; Lopes et al., 2019; Pacheco et al 2015; Laengner et al., 2019) e iii) Sentinel 2 (e.g. Bué et al., 2020).

Dada a complexidade das zonas húmidas, em particular, as que apresentam extensas zonas intertidais controladas pelo efeito das oscilações do nível da maré, e colonizadas por plantas com ciclos fenológicos distintos, é geralmente recomendada a utilização de dados de diferentes fontes (Guo et al., 2017), complementados por dados ópticos multiespectrais, SAR (“*Synthetic Aperture Radar*”), e LiDAR (“*Light Detection and Ranging*”).

II.1.1- Bandas derivadas e classificação não supervisionada

As bandas derivadas correspondem à combinação de bandas espectrais através do cálculo de índices, ou aplicando a análise de componentes principais (ACP) que permite eliminar informação espectral redundante, e assim reduzir o volume de dados utilizados.

O conceito do Índice de Vegetação (IV) é um dos sucessos mais persistentes da Detecção Remota terrestre. As características fisiológicas e anatómicas da vegetação dão origem a respostas espectrais distintas que podem ser detectadas em qualquer ambiente, e se levados em consideração os devidos cuidados, permitem que as propriedades sejam inferidas a partir do espectro reflectido. A vegetação saudável absorve o espectro de luz na região do visível (especialmente o vermelho) através da clorofila e de outros pigmentos. No infravermelho próximo (NIR- “*Near-Infrared*”), a luz é fortemente reflectida pelas folhas, porque a justaposição de células, contendo essencialmente água, com espaços de ar entre eles, cria um meio forte de dispersão. O factor chave no desenvolvimento dos índices IV baseia-se no contraste da reflectância de duas bandas. Os primeiros trabalhos que foram desenvolvidos sobre este tópico identificaram uma variedade de combinações do NIR, e das bandas da região do visível, onde se destaca o NDVI (“*Normalized Difference Vegetation Index*”; Huete et al., 2002 in Jenson 2014). Este índice NDVI pode ser usado para distinguir áreas vegetadas de áreas sem cobertura vegetal. O índice NDVI é usado no Projecto FAST (“*Foreshore Assessment using Space Technology*”; 2017) que tem como objectivo estudar áreas vegetadas e temporariamente submersas, em frente a diques ou enrocamentos (“*seawalls*”), e com isso, avaliar como podem contribuir para a protecção de zonas costeiras da erosão. Os valores de reflectância à superfície no “*Red*” e no NIR podem ser afectados por algumas das características biofísicas da vegetação, e por isso, é recomendado usar o índice NDVI para caracterizar a vegetação que cobre os sapais, o raso de maré e a água. Os valores do índice NDVI aumentam geralmente com o aumento da cobertura vegetal, da biomassa e com o vigor da vegetação, e também podem variar em função do tipo de vegetação. Os valores de NDVI inferiores a zero indicam a presença de água. No raso de maré, os valores de NDVI elevados indicam a presença de elevada

biomassa de microfitobentos (i.e. microalgas unicelulares e coloniais que habitam a superfície do sedimento), e de diferentes tipos de macroalgas e de “ervas marinhas”.

O índice NDVI foi adoptado para estudar a parte terminal do estuário do Rio Mira, tendo sido calculado usando a equação 1 (Tabela 2), variando o seu valor entre 1 e -1.

O índice “*Normalized Difference Water Index*” (NDWI) é também aplicado para discriminar áreas da superfície terrestre cobertas por água. O índice NDVI pode ser obtido usando diferentes bandas que estão incluídas nos dados multiespectrais, como o “*Green*” e o “*shortwave infrared*” (SWIR), o “*Red*” (vermelho) e o SWIR, e o “*Green*” e o NIR (in Mahdianpari et al., 2018). O índice NDWI foi calculado a partir da equação 2 que usa as bandas “*Green*” e NIR dos dados Sentinel-2, com a resolução espacial de 10 m.

O índice “*Normalized Water index*” (NWI), aplicado por Silio-Calzada et al. (2017; equação 3), apresenta valores negativos para píxeis que correspondem a “terra”, enquanto os valores positivos correspondem a áreas com vegetação e inundadas (e.g. zonas húmidas), e corpos de água (“*water bodies*”).

O índice “*Visible Atmospherically Resistant Index Green*” (VARIGreen; equação 4) foi desenvolvido para minimizar os efeitos da atmosfera, permitindo estimar fracções de vegetação, com um erro inferior a 10%, mesmo com uma larga amplitude de espessura óptica da atmosfera (Jensen, 2014).

O índice “*Enhanced Vegetation Index 2*” (EVI2; equação 5) foi criado para minimizar a influência do solo e dos aerossóis, e para tornar o índice de vegetação mais sensível a áreas de elevada biomassa. Este índice representa uma optimização das bandas “*Blue*”, “*Red*” e NIR, e foi desenhado para extrair a cobertura da vegetação, independentemente da presença do solo subjacente, e das variações dos aerossóis na atmosfera (Chuvieco, 2016).

As classificações tradicionais baseadas em píxeis, supervisionada ou não supervisionada, utilizam dados da superfície do solo baseados na informação espectral dos píxeis. Contudo, convém referir, que a estrutura e a textura das características do solo (“*ground features*”), bem como as relações entre píxeis contíguos não são consideradas nesta classificação.

Índice

Normalized Difference Vegetation Index

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad [eq.1] \quad \text{Tucker (1979 in Silio-Calzada et al, 2017)}$$

Normalized Difference Water Index

$$NDWI = \frac{Green-NIR}{Green+NIR} \quad [eq.2] \quad \text{McFeeters (1996)}$$

Normalized Water index

$$NWI = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n VIS_i - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m IR_j}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n VIS_i + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m IR_j} \quad [eq.3] \quad \text{Silio-Calzada et al. (2017)}$$

Visible Atmospherically Resistant Index Green

$$VARI_{green} = \frac{Green-Red}{Green+Red-Blue} \quad [eq.4] \quad \text{Ghosh et al. (2016, in Calleja et al 2017)}$$

Enhanced Vegetation Index 2

$$EVI2 = 2.5 \frac{NIR-Red}{NIR+2.4Red+1} \quad [ep.5] \quad \text{Gitelson et al. (2002; in Calleja et al 2017)}$$

Tabela 2- Índices de vegetação e de água. NIR=B8; “Red” = B4; “Green” =B3; “Blue” = B2. VIS - “Visible” e IR- “Infrared”.

Com o aumento da resolução espacial das imagens de satélite, é agora possível identificar muitos tipos de cobertura do solo que apresentam notórias diferenças entre eles, o que torna difícil reconhecer “*ground features*” recorrendo unicamente às classificações baseadas na análise de “*píxeis*”.

A classificação baseada em objectos (“*Object-based classification*”) é uma nova metodologia que foi desenvolvida para imagens de satélite com elevada resolução espacial. Esta classificação pode integrar dados de Detecção Remota de múltiplas fontes ou de Detecção Remota e de dados de sistemas de informação geográfica (SIG). A classificação baseada em objectos agrupa objectos que apresentem características idênticas (“*similar features*”), tais como sejam as formas similares do “*píxel*”, a cor ou a textura, e classifica-as baseando-se nas características dos objectos (Guo et al., 2017).

A classificação por objectos tem vindo a ser usada para proceder ao mapeamento de zonas húmidas (e.g. Mahdianpari et al., 2018; Calleja et al., 2019) ou para a identificação de “reservatórios de água” (“*water body*”; Kaplan e Avdan, 2017). Mahdianpari et al. (2018) consideraram que a classificação por objectos é distinta e mais eficaz que a classificação baseada na análise dos píxeis. No entanto, é de salientar que a melhoria na qualidade da classificação das zonas húmidas obtida por estes autores, aumentou significativamente quando foram usados os dados ópticos (Sentinel-2) conjuntamente com dados SAR (Sentinel-1).

A análise comparativa da aplicação de metodologias de classificação baseadas em píxeis, em objectos e mista, foi realizada no estuário de Oyambre, de pequenas dimensões (perímetro 13.6 km) com o objectivo de detectar a presença de uma planta invasora desta zona estuarina localizada em Espanha (Calleja et al., 2019). Estes autores concluíram que a classificação baseada em píxeis conduziu a melhores resultados na análise da imagem de satélite. Por outro lado, no estudo da baía de Santander com 22.7 km² de extensão também realizado por Calleja et al. (2017), ficou demonstrado que a classificação baseada no cálculo de índices, usando uma árvore de decisão, e na classificação não supervisionada “*K-Means*”, é a mais adequada para melhorar a classificação de zonas estuarinas de pequena dimensão.

A classificação não supervisionada, utilizando designadamente a “*Cluster analysis*” (e.g. “*K-Means*”), não requer a definição *à priori* de um conjunto de classes

que devem ser consideradas na classificação final da superfície terrestre (“*land surface*”). O objectivo da classificação não supervisionada é determinar o número (e não inicialmente a sua identidade) das categorias de acordo com as quais a superfície coberta pela imagem de satélite vai ser classificada, e alocar os pixéis a essas categorias (Mather e Koch, 2011). Após a aplicação da classificação não supervisionada é necessário interpretar as categorias (“*clusters*”) espectrais, e atribuir uma correspondência com as características da área terrestre que empiricamente se conhecem.

II.1.2- Dados de satélite

Os dados de satélite são obtidos a partir de sensores com características distintas, sendo a sua tipologia baseada no mecanismo usado na detecção da energia electromagnética. A adequabilidade dos dados de um sensor à obtenção de informação geográfica para se atingir um determinado objectivo vai depender da sua resolução, seja ela: espacial, espectral, radiométrica ou temporal.

A resolução espacial identifica o menor objecto que pode ser detectado pela imagem. Como as imagens de satélite são obtidas sob a forma digital, a resolução espacial é comumente expressa como o comprimento (em metros) da unidade espacial mínima na imagem, designada por “*píxel*” (elemento da imagem; Chuvieco, 2016). A resolução espacial dos dados Sentinel-2 varia de acordo com a banda espectral considerada (Fig. 13).

A resolução espectral refere-se ao número de bandas fornecidas pelo sensor e à amplitude de cada uma delas. Regra geral, quanto maior o número de bandas maior será a capacidade de discriminação do sensor. Idealmente as bandas espectrais devem ser suficientemente estreitas para distinguirem características específicas que, de outro modo, podem não ser identificáveis (Chuvieco, 2016). A resolução espectral dos dados Sentinel-2 é descrita na Figura 13.

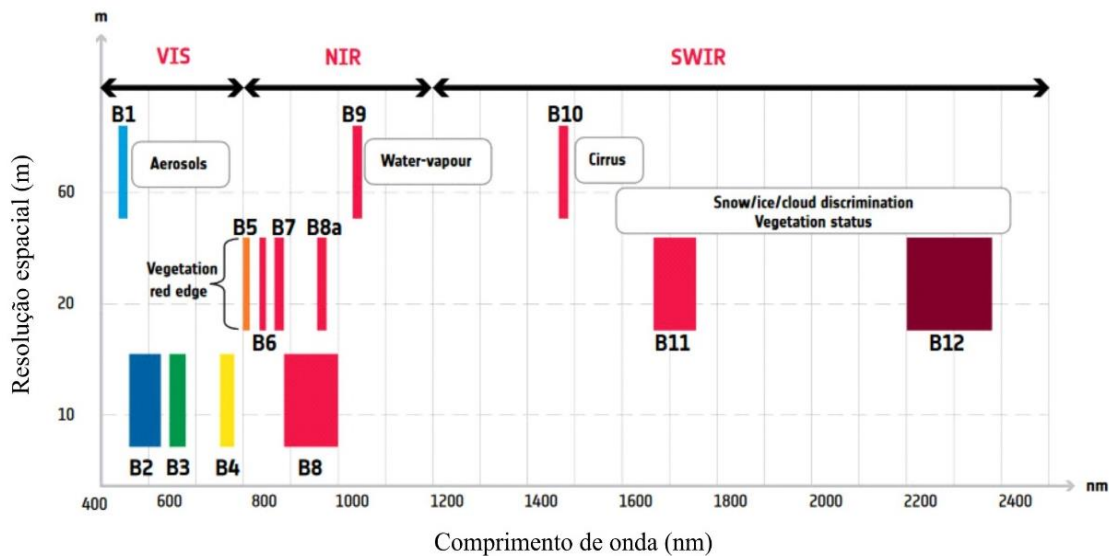


Figura 13- Resolução espacial e amplitude espectral das imagens Sentinel-2 (*Sen2Cor*, 2016).

A resolução radiométrica define a sensibilidade do sensor, isto é, a sua capacidade para discriminar pequenas variações na radiância espectral registada. A resolução radiométrica é importante para discriminar objectos com assinaturas espectrais idênticas. Nos sensores ópticos a imagem é adquirida digitalmente e a resolução radiométrica é expressa como o número de “bits” usados para armazenar o sinal de “input” (Chuvieco, 2016). Quanto maior a resolução radiométrica, maior será a capacidade do sensor para detectar diferenças na intensidade ou na reflectância. A resolução radiométrica é geralmente expressa pelo número de “bits”, tipicamente entre o intervalo 8 a 16 bits. A resolução radiométrica do sensor MSI (“*MultiSpectral Instrument*”) é de 12 bits (estas medidas são convertidas para reflectância e armazenadas como 16 bit “*integers*” nos produtos S2), (ESA, 2015).

A resolução temporal de um satélite em órbita corresponde à sua frequência de revisitação a um determinado local. No caso dos dados Sentinel-2 a frequência de revisitação de apenas um satélite é de 10 dias, e a constelação tem o tempo de revisitação de 5 dias (ESA, 2015).

II.1.2.1- Dados Sentinel-2

Os dados de satélite Sentinel-2 estão associados ao programa Copernicus da Agência Espacial Europeia (ESA) que recorre a imagens adquiridas a partir de dois satélites (Sentinel-2A e Sentinel-2B). Os objectivos da missão Sentinel e as características dos dados Sentinel-2 MSI (“*MultiSpectral Instrument*”) encontram-se descritas na documentação da ESA (2015) e no site oficial (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>). A aquisição dos dados Sentinel-2 visa a produção de informação geográfica aplicada a estudos de planeamento e monitorização da superfície terrestre, de desastres naturais (e.g. fogos, secas), de acidentes tecnológicos e de crises humanitárias e de segurança (e.g. vigilância marítima e de infraestruturas).

As imagens de satélite usadas neste estudo, foram acedidas através das plataformas “*Copernicus Open Access Hub*” (<https://scihub.copernicus.eu/>) e CREODIAS (<https://creodias.eu/data-offer>). Na primeira plataforma foi possível obter as imagens Sentinel-2A com o nível de processamento *Level-1C* que inclui correcções radiométricas e geométricas, ortorectificação, e o registo espacial com um sistema de referência global com o rigor do sub-píxel. Neste caso, os dados do Level-1C fornecem informação sobre a reflectância no topo da atmosfera (TOA- “*Top-of-Atmosphere reflectance*”). Na segunda plataforma CREODIAS foram obtidas imagens Sentinel-2 relativas aos sensores 2A e 2B, para datas mais recentes, que tal como nas imagens com o nível de processamento Level-1C, já se encontram ortorectificadas e divididas em “*tiles*” de 100 km² na projecção UTM/WGS84. Contudo, as imagens com o nível de processamento *Level-2A* disponibilizam valores de reflectância na base da atmosfera (BOA- “*Bottom-Of-Atmosphere*”).

O sensor Sentinel-2 “*Multispectral Instrument*” (MSI), regista 13 bandas espectrais do “*Visible*” (VNIR) e “*Near Infra-Red*” (NIR) ao “*Short Wave Infra-Red*” (SWIR) com resolução espacial distintas: i) quatro bandas com 10 metros (B2-490 nm, B3-560 nm, B4- 665 nm e B8-842 nm); ii) seis bandas com 20 metros (B5-705 nm, B6-740 nm, B7-783 nm, B8a-865 nm, B11-1 610 nm e B12-2 190 nm); e iii) três bandas com

60 metros (B1-443 nm, B9-945 nm e B10-1 375 nm). A resolução espacial e espectral dos dados é resumida na Figura 13 (ESA, 2015).

As características dos dados Sentinel-2 acima descritos, demonstram a sua potencialidade de utilização que é traduzida pela sua resolução: i) espectral com 5 bandas para a vegetação; ii) espacial com 6 bandas com 10m de resolução; e iii) temporal com tempo de revisitação de 5 dias. Estes atributos permitem a monitorização de sistemas sedimentares dinâmicos como os estuários, que são alvo da influência diária do ciclo das marés e das variações sazonais da cobertura vegetal.

II.1.2.2- Pré-processamento das imagens de satélite Sentinel-2

Na Figura 14, pode-se observar quais foram as principais etapas consideradas na etapa de Pré-processamento dos dados Sentinel-2: i) a correcção atmosférica; ii) a reamostragem (“*Resampling*”), e iii) a sub-imagem (“*Subset*”).

A correcção atmosférica foi realizada sobre as imagens com o nível de processamento *Level-1C*. Estas imagens forneceram a informação sobre a reflectância no topo da atmosfera (TOA- “*Top-of-Atmosphere reflectance*”), que constituiu o “*input*” do Sen2Cor “*plugin*” (Sen2Cor255 e Sen2Cor280 disponíveis no Sentinel “*Application Platform*” (SNAP, v 5.0 Sentinel-2 “*Toolbox*”). Nas imagens de satélite anteriores a 2017, usou-se o Sen2Cor255, e para as mais recentes recorreu-se ao Sen2Cor280. O Sen2Cor “*plugin*” executa a correcção atmosférica obtendo-se valores de reflectância na base da atmosfera (BOA- “*Bottom-Of-Atmosphere*”) a partir de dados TOA originais (Level-1C).

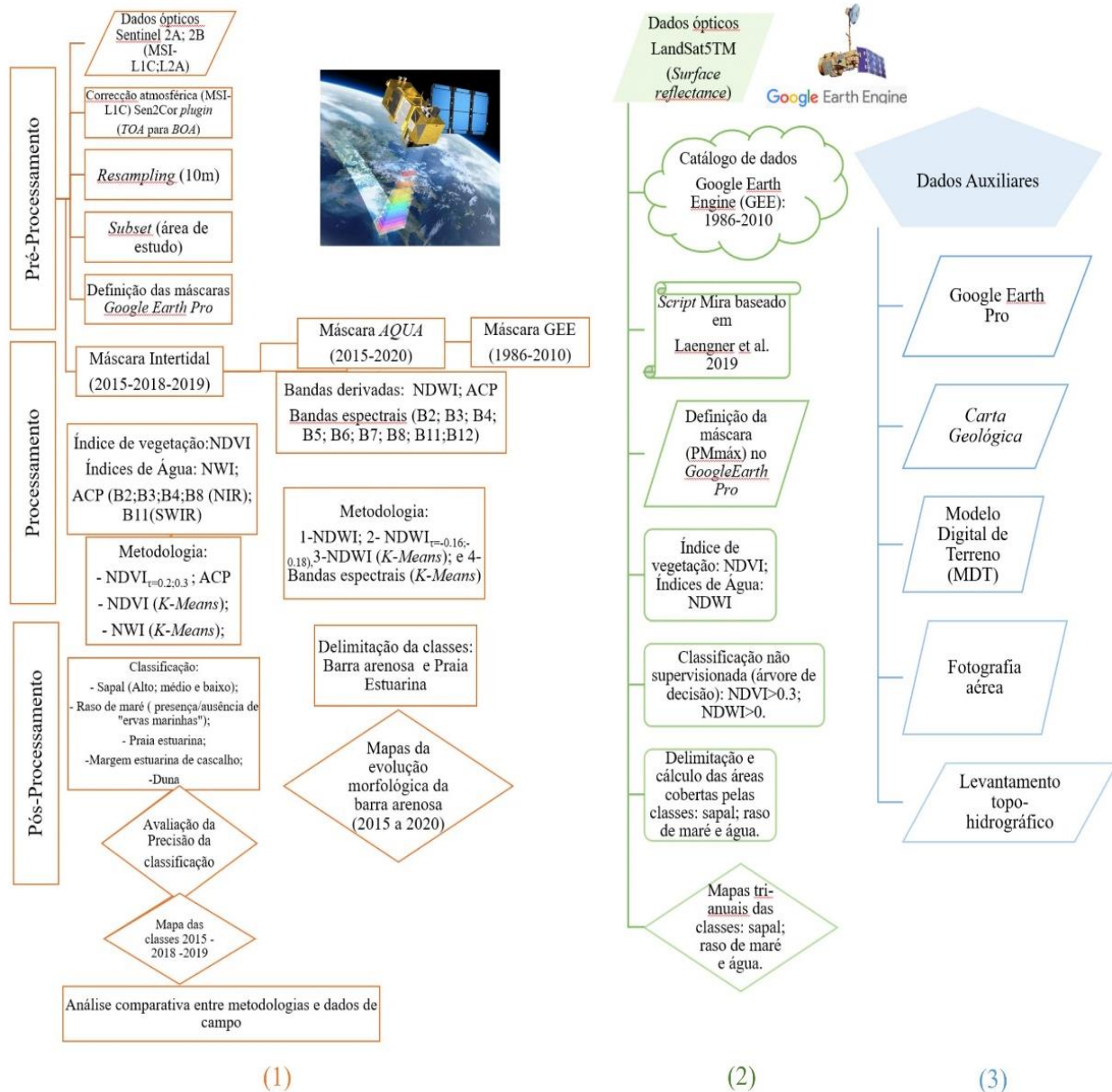


Figura 14- Fluxograma metodológico aplicado aos dados Sentinel-2 (1), aos dados Landsat 5 TM (2) e na descrição dos dados auxiliares (3).

Para as datas mais recentes, acedeu-se à plataforma CREODIAS para obter imagens Sentinel-2 adquiridas pelos satélites 2A e 2B. Estas imagens de satélite são mais vantajosas porque muitas já estão no nível de processamento Level-2A, apresentando valores de reflectância na base da atmosfera (BOA). Tanto as imagens Sentinel-2 como as que apresentam o nível de processamento Level-1C, estão ortorectificadas e divididas em “tiles” de 100 km² na projecção UTM/WGS84.

Os dados Sentinel-2 originais contêm 13 bandas com diferentes tamanhos e resoluções, tendo sido necessário recorrer à reamostragem (“*Resampling*”). A reamostragem foi realizada usando o SNAP, através da selecção da Banda 2, com 10 metros de resolução, e considerando o método “*Nearest*” como “*Upsampling Method*”.

A subimagem (“*Subset*”) foi extraída a partir da imagem original e inclui a parte terminal do estuário do Rio Mira compreendida entre a foz e o lugar do Parral/Várzea Grande (31 km²), sobre a qual foram digitalizadas no monitor do computador, por análise visual, as máscaras que definiram a zona intertidal (§ II.1.3).

II.1.2.3- Dados de satélite Landsat 5 TM

As imagens Landsat 4-5 TM (“*Thematic Mapper*”) contêm sete bandas espectrais. As bandas 1 a 7 apresentam resolução espacial de 30 m (Fig. 15). A resolução espacial da banda 6 (“*Thermal infrared band*”) é de 120 metros, mas a reamostragem (“*Resampling*”) é executada para 30 m. A projecção usada é a UTM -WGS 84.

Os dados Landsat 5 TM, referidos neste estudo, e que são usados por Laengner et al. (2019) (§ III.1.6), correspondem a informação com o nível de processamento Level-2A e com correcção atmosférica. Os dados da reflectância na superfície podem ser obtidos a partir do “*Landsat Surface Reflectance Climate Data Record*” (Landsat CDR). A classificação implementada por Laengner et al. (2019, 2020) no “*Google Earth Engine*” permitiu aceder aos produtos Landsat disponíveis a partir do catálogo de dados do GEE (“*data catalog*”).

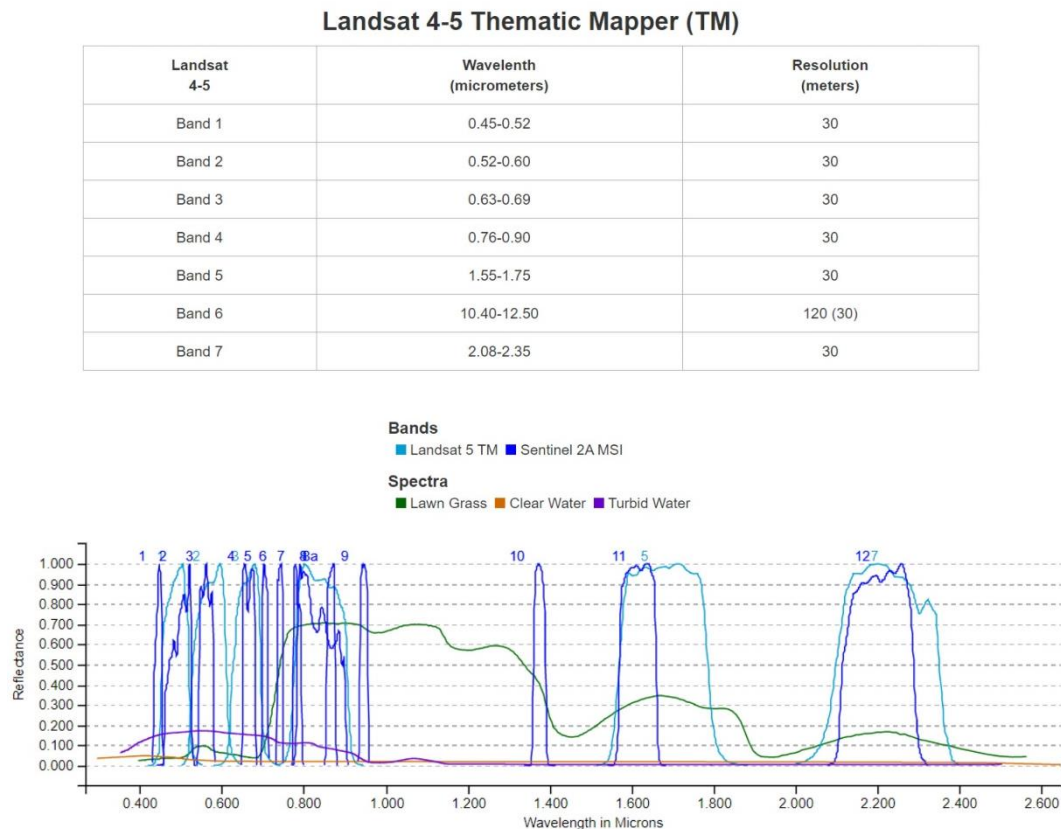


Figura 15- (A) Resolução espacial e amplitude espectral dos dados Landsat 4-5 TM (“Thematic Mapper”). (Fonte: https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products); (B)- Comparação entre as bandas Sentinel-2 e Landsat 5TM e três curvas espectrais exemplificativas: vegetação rasteira; “água límpida” e “água turva” (<https://landsat.usgs.gov/spectral-characteristics-viewer>).

II.1.3 - Definição das áreas de interesse

O fluxograma metodológico que está representado na Figura 14, indica que após a realização da reamostragem e da obtenção da sub-imagem de referência, foram definidas as diferentes máscaras usadas na fase seguinte de processamento. O primeiro passo da metodologia centrou-se na necessidade de definir a zona intertidal que depende da amplitude das marés. Para este efeito, foi necessário considerar a informação relativa aos níveis máximos e mínimos da maré: a LMPMAVE (Linha de máxima PM de águas vivas equinociais), e a LMBMAV (Linha da máxima BM de águas vivas), tendo como

referência os dados adquiridos pelo marégrafo instalado no porto de Sines, localizado a cerca de 27 km para Norte. Recorrendo ao conhecimento prévio da área de estudo e às imagens do “*Google Earth Pro*” que coincidem com níveis de maré de PM (2015-05-16; 3.4m) e de BM (2009-10-08; 0.8m) de Marés Vivas, realizou-se a digitalização manual do limite máximo e mínimo do nível da maré. Os ficheiros KML daí resultantes foram importados para o SNAP onde, por sua vez serviram para definir a zona intertidal através da subtracção das máscaras obtidas (Fig. 16). A máscara que é designada por intertidal exclui o canal estuarino, mas inclui o limite superior das praias estuarinas e do campo dunar contíguo à Praia das Furnas. Esta máscara intertidal foi usada na maioria dos processamentos que incidiram sobre a zona da parte terminal do estuário do Rio Mira, entre a foz, junto a Vila Nova de Milfontes, e o lugar do Parral, localizado a montante. Deste modo, foi desenvolvida uma aproximação expedita para obter a LMPMAVE (Linha de máxima preia-mar de águas vivas equinociais) e a LMBMAV (Linha de máxima baixa-mar de águas vivas equinociais), que pouco se afasta dos limites reais que são referidos e discutidos aquando da definição dos limites nos instrumentos de gestão territorial (IGT), como resposta à Lei 54/2005 de 15 de Novembro e ao Decreto-lei 129/2008 de 21 de Julho.

A segunda máscara que se designou de “*AQUA*” (0.86 Km²; Fig. 17) inclui a área total a jusante da ponte, e também o limite superior das praias estuarinas, excluindo o campo dunar contíguo à Praia das Furnas. Na máscara “*AQUA*” inclui-se o canal estuarino no processamento que visou a identificação e monitorização das barras arenosas que nele estão contidas.

A terceira máscara designada de “*GEE*” ((“*Google Earth Engine*”; 3.14 km² Fig. 17; 2 na Fig. 14) inclui a área total entre a foz do Rio Mira e o local da Cerca que se localiza a montante da ponte. Junto à foz, a máscara “*GEE*” inclui a digitalização do limite máximo de PM das praias estuarinas e do campo dunar contíguo à Praia das Furnas. A máscara “*GEE*” foi incluída no “*script*” usado pela metodologia de Laengner et al. (2019, 2020) no “*Google Earth Engine*”, com imagens Landsat 5 TM (§ II.1.6; Anexo I).

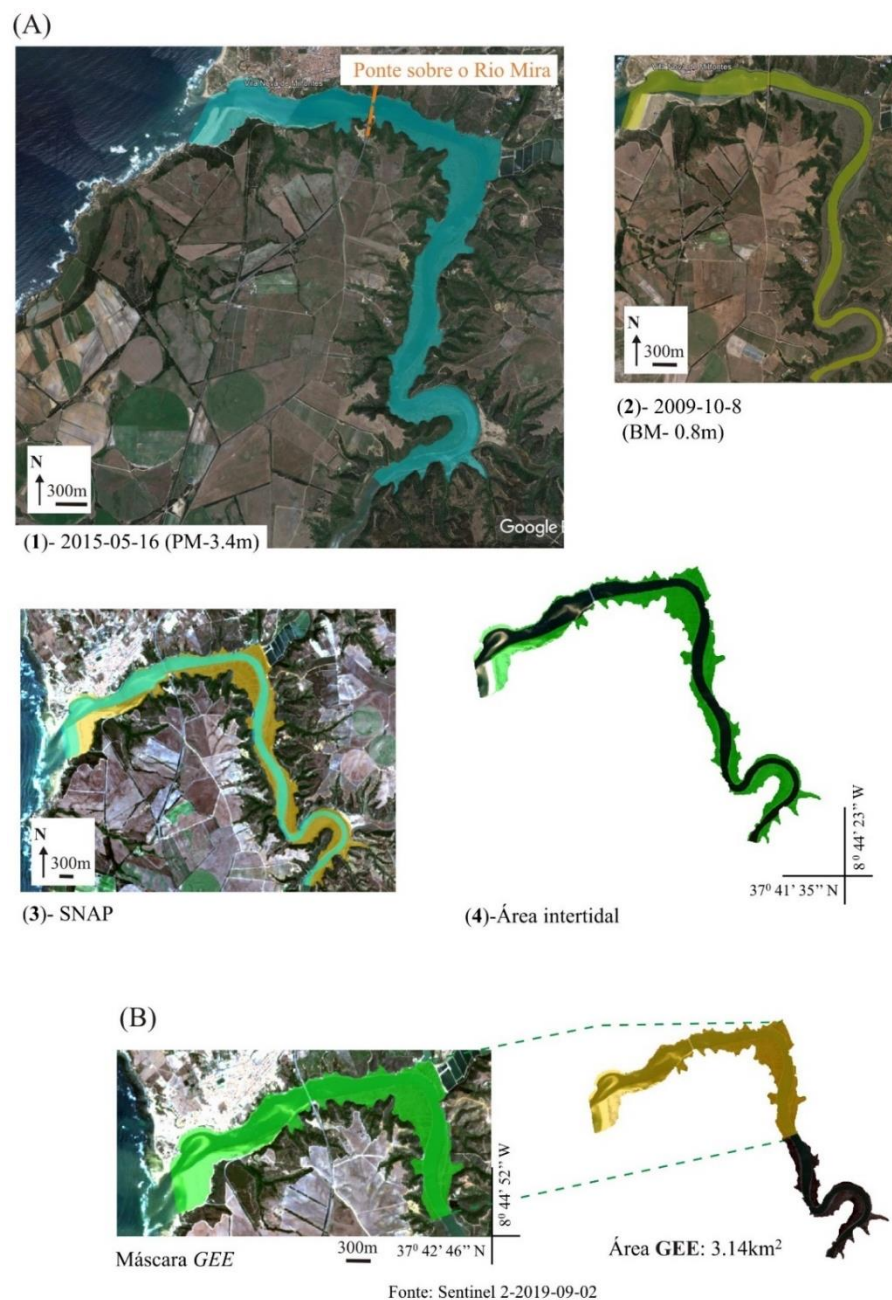


Figura 16- Caracterização das máscaras. (A)- Sentinel-2: (1)- Digitalização do limite máximo da Preia-Mar (PM) e do campo dunar da Praia das Furnas; (2)- Digitalização do limite mínimo de baixa-Mar (BM); (3) Subtracção das máscaras [1-2=Área intertidal] e (4) Máscara intertidal. (B)- Landsat 5 TM: Máscara “GEE”.

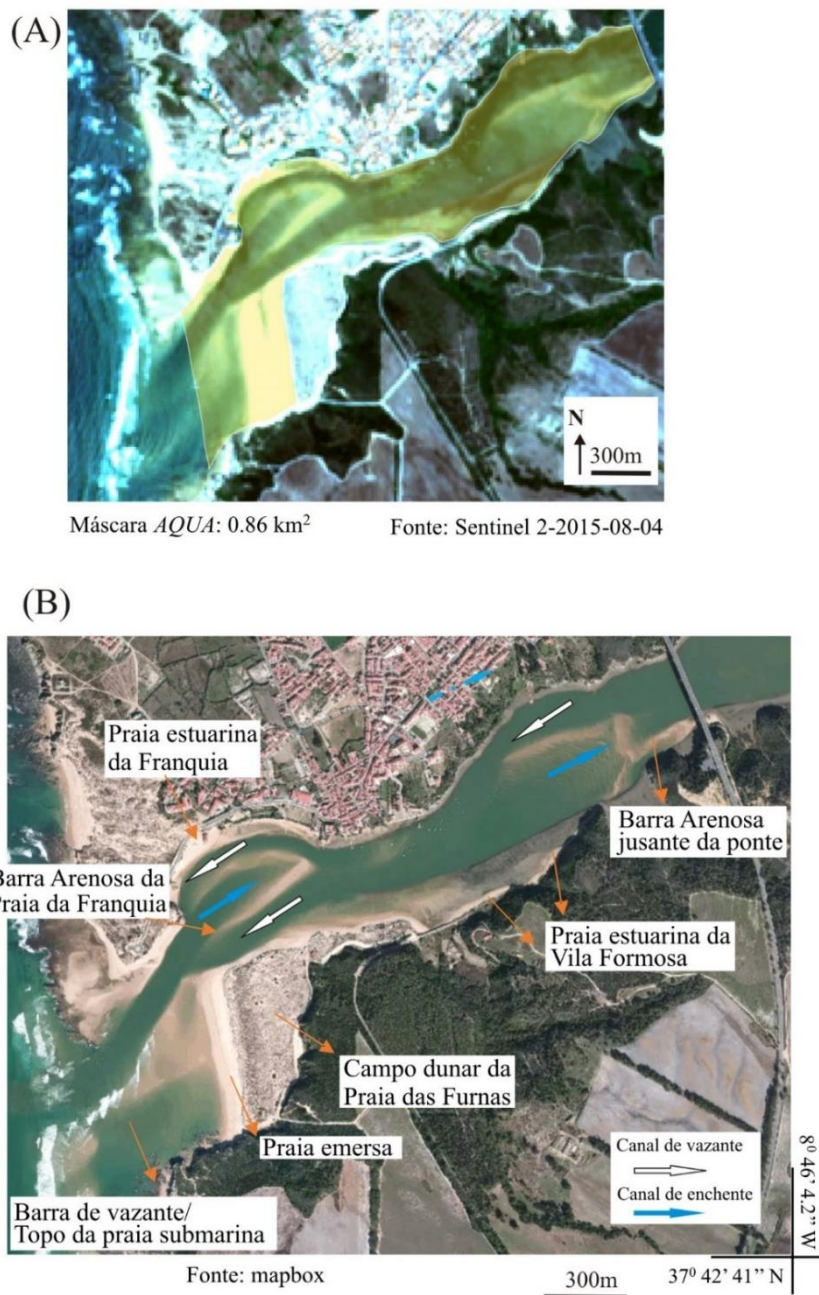


Figura 17- (A)- Máscara “*AQUA*” usada no pré-processamento das imagens Sentinel-2 para o estudo da morfologia da barra da Praia da Franquia; (B)- Enquadramento das principais unidades morfossedimentares (UMFS) do sector distal do estuário do Rio Mira, descritas pelas classes identificadas na máscara “*AQUA*”: barra arenosa (ba), praia estuarina (pe) e margem do rio formada por cascalho/rocha consolidada (Mgc) e campo dunar (duna).

II.1.4- Processamento das imagens Sentinel-2

A classificação das imagens de satélite Sentinel-2, está resumido no fluxograma metodológico da Figura 14. Neste fluxograma ilustra-se que a obtenção da classificação final depende da máscara aplicada a cada uma das imagens Sentinel-2, após o cumprimento das etapas de pré-processamento (imagens S2A). O processo de classificação adoptado está baseado numa classificação não supervisionada (“*K-Means*”; § II) seguida, em alguns dos casos, de um processo de pós-classificação com a aplicação de um filtro (e.g. “*Non-Linear Filters*”; “*median 3×3*”) com o objectivo de melhorar a visualização da classificação final.

II.1.4.1- Procedimento metodológico aplicado à zona intertidal

A metodologia que foi aplicada à classificação das imagens de satélite S2 permitiu reunir informação geográfica que possibilitou definir as principais classes que caracterizam a zona intertidal do estuário do Rio Mira. Numa fase inicial, optou-se por aplicar a metodologia de Calleja et al. (2017) que foi desenhada por estes autores para identificar as áreas do estuário cobertas pela “erva marinha” *Zostera noltei*. A metodologia desenvolvida por estes autores está resumida na árvore de decisão que consta da Figura 18. No entanto, decidiu-se substituir a primeira etapa do seu método pela análise visual e digitalização directa no monitor do computador de máscaras sobre imagens do “*Google Earth Pro*”, posteriormente importadas para ambiente SNAP (Fig. 16). Nesta análise escolheu-se o índice NWI (Silio-Calzada; 2017; equação 3 da Tabela 2) para delimitar a classe raso de maré, tendo por base uma imagem Sentinel-2 adquirida durante um período de cheias que ocorreu no Rio Mira (Fig.10).

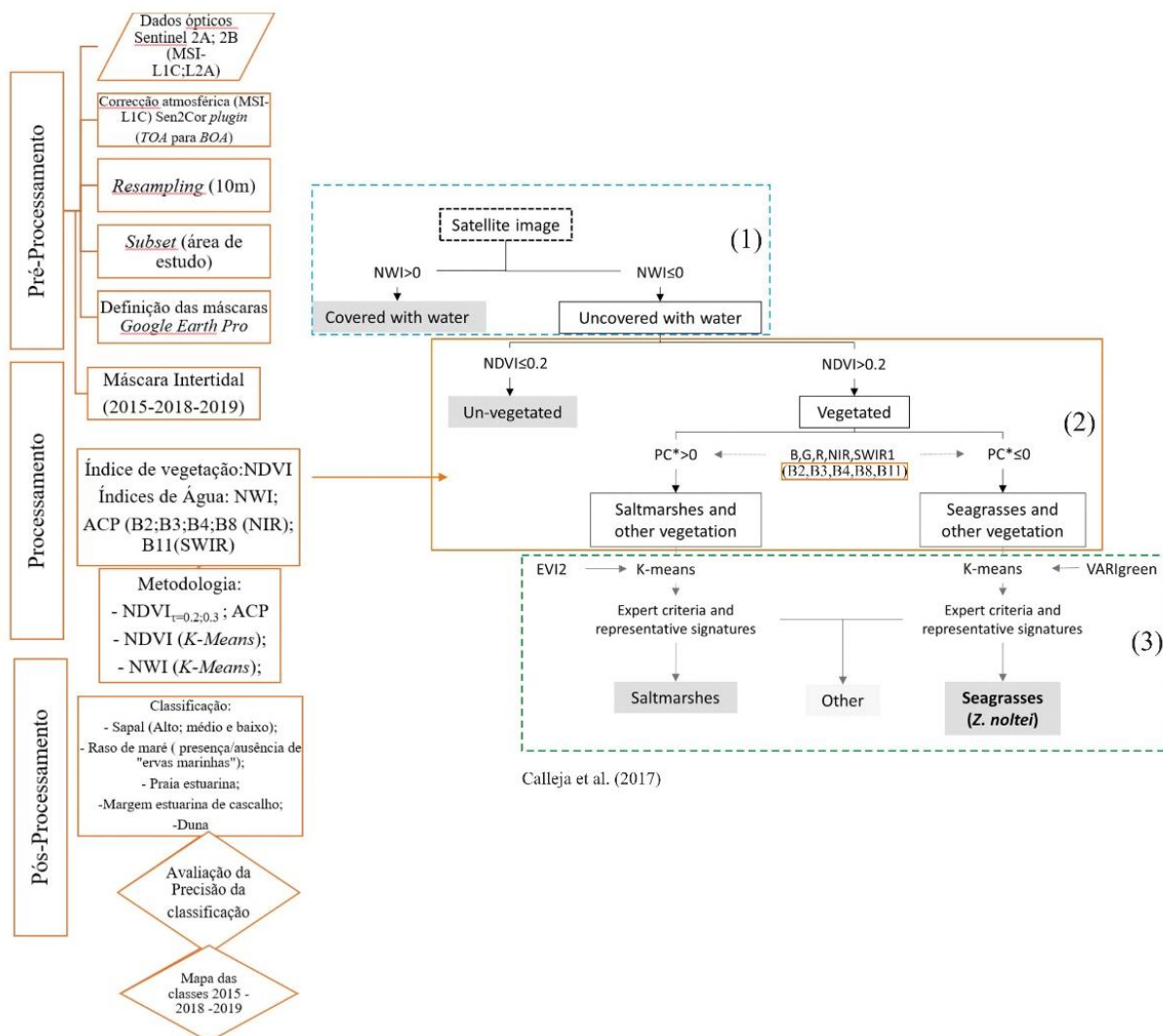


Figura 18- Fluxograma metodológico aplicado ao estudo da zona intertidal e árvore de decisão da metodologia de Calleja et al. (2017): (1) definição da área de interesse; (2) aplicação dos limiares do índice NDVI e da ACP, e (3) índices VARIGreen e EVI2 e classificação não supervisionada “K-Means”.

A adequação da aplicação do limiar 0.2 do índice NDVI, na delimitação da área intertidal vegetada (etapa 2 da Fig. 18), foi determinada por inspeção visual e por conhecimento empírico, tendo-se constado que o limiar 0.3 do NDVI é mais adequado

para caracterizar as diferentes classes resultantes do processo de classificação, em particular, quando aplicado à zona do estuário localizada a montante da ponte sobre o Rio Mira (§ III.2).

A análise de componentes principais (ACP) das bandas B2, B3, B4, B8 e B11 viabilizou a definição de três componentes, ACP1, ACP2 e ACP3, que em conjunto com os limiares do NDVI foram importantes para descrever o padrão interanual da zona intertidal a montante da ponte sobre o Rio Mira.

A etapa 3 não teve grande relevância para distinguir as diferentes classes do estuário do Rio Mira, já que o “*raster*” resultante dos valores dos índices VARIGreen e EVI2 na zona intertidal apresentaram o efeito “*salt and pepper*”, o que não foi possível de atenuar sem que se perdesse informação mesmo após a aplicação de filtros na fase de pós-processamento.

O processo de classificação desenvolvido neste trabalho centrou-se na aplicação do índice NDVI usando a classificação não supervisionada (“*K-Means Cluster Analysis*”) que está disponível no SNAP. Para tal, foram considerados os seguintes parâmetros de processamento: “*Number of clusters*” (4), “*Number of iterations*” (30), “*Random seed*” (31415), “*Source band*”: NDVI e “*ROI-mask*”: “intertidal”. Este procedimento de classificação teve como objectivo principal, a identificação e delimitação das diferentes classes de sapal (alto; médio e baixo) e de raso de maré (coberto ou não por “ervas marinhas”). A sua aplicação à zona intertidal total estudada, ajudou a fazer a correspondência entre cada um dos “*clusters*” resultantes da classificação não supervisionada *K-Means* e as classes mais representativas da zona intertidal, a jusante e a montante da ponte sobre o Rio Mira.

O processamento dos dados Sentinel-2 teve sempre por base a análise da imagem de satélite adquirida no dia 2019-09-02 (Fig. 19) de modo a que fosse possível usar as observações *in situ* realizadas numa campanha de campo em 2019-09-05, como dados auxiliares na interpretação da classificação final.

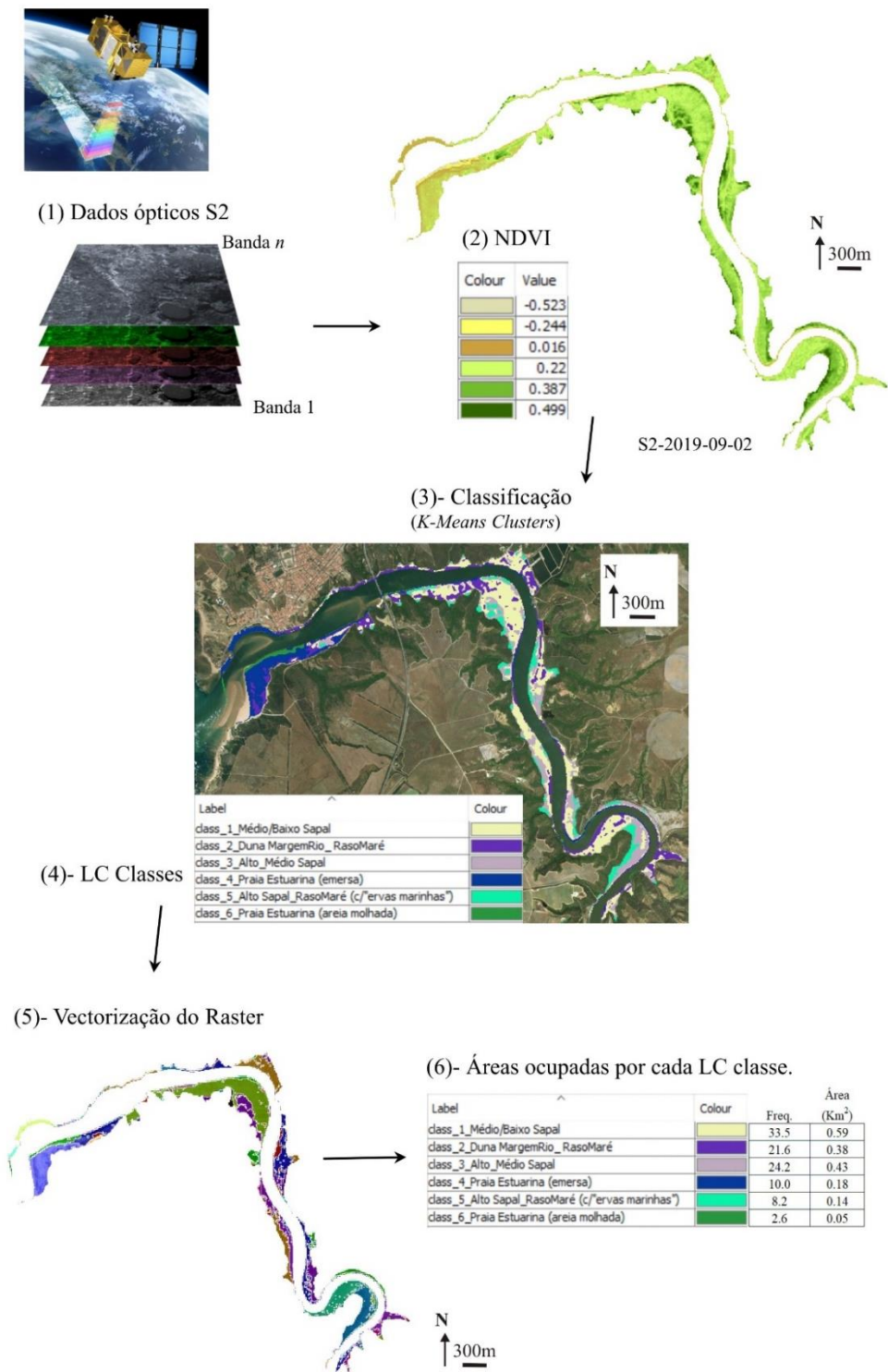


Figura 19- Imagem S2 de 2019-09-02. (1) Bandas S2A; (2) Cálculo do índice NDVI; (3) Classificação não supervisionada do NDVI (“*KMeans*”; 6 classes); (4) Interpretação de cada um dos “*clusters*”; (5) Polígonos resultantes do processo de vectorização do raster da classificação e (6) Áreas ocupadas por cada classe (LC) presentes na área intertidal.

II.1.4.2- Procedimento metodológico aplicada à evolução da barra arenosa

A metodologia que foi aplicada para a identificação, delimitação e análise da evolução da morfologia das barras arenosas está resumida no fluxograma metodológico da Figura 14. Numa fase inicial, optou-se pela abordagem de Hagenaars et al. (2018) que foi desenvolvida por estes autores para monitorizar zonas costeiras realimentadas artificialmente (e.g. célula costeira de Dutch Delfland, Holanda), e na perspetiva da abordagem “*building with nature*“. Estes autores usaram um limiar do índice NDWI ($\tau_{=0.16}$), considerando que os valores obtidos que lhe sejam inferiores correspondem à classe “*Water*“, sendo os valores superiores classificados como “*Land*“. Convém salientar, que Hagenaars et al. (2018) usam uma equação para calcular o índice NDWI que é distinta da inicialmente proposta por McFeeters (1996). Na equação de Hagenaars et al. (2018) a posição das bandas verde (S2-B3; λ_{Green}) e “*Near Infra-Red*“ (NIR; λ_{NIR} S2-B8) foi trocada em ambos os membros da equação (NDWI § II.1.1). Decidiu-se escolher a equação 2 para calcular o índice NDWI e o limiar NDWI ($\tau_{=0.16}$), de modo a permitir delimitar a área emersa da barra arenosa, mas os resultados obtidos não foram satisfatórios, em particular quando a área imersa se encontra coberta por uma reduzida coluna de água (i.e. da ordem de menos de 1 m de profundidade). Para ultrapassar este obstáculo foram testados outros procedimentos (Figs.14 e 20) mas mantendo a utilização do índice NDWI como banda derivada principal ou recorrendo às bandas espectrais B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B11 e B12. Quando os resultados obtidos eram insatisfatórios, em termos de avaliação visual, foi aplicada a cada uma destas bandas uma classificação não supervisionada (“*K-Means*“) considerando 4 classes. Os diferentes procedimentos seguidos estão ilustrados na Figura 20, podem ser resumidos da seguinte forma: i) Determinação do índice NDWI (equação 2) considerando a máscara “*AQUA*“, seguida da transformação do “*raster*“ em vectorial; os polígonos obtidos dividem a área de estudo em classes distintas: barra arenosa, praia estuarina, campo dunar e margem do rio; este procedimento apresenta resultados muito satisfatórios quando a hora de aquisição da imagem Sentinel-2 ($\approx 11:21$ UTC) concide com o período de tempo próximo do valor mínimo da BM; ii) Utilização de limiares do NDVI (e.g. $\tau_{=0.16}$; $\tau_{=0.18}$); na maioria dos casos a aplicação de limiares conduz ao somatório das áreas emersa e imersa, sem que

tenhamos controle (nem mesmo visual) deste facto; também se verifica que, em alguns casos, o limiar escolhido foi demasiado restritivo resultando daí uma subvalorização da estimativa da área emersa da barra arenosa (Fig. 20); esta abordagem parece ser eficaz se na análise comparativa entre imagens de satélite consecutivas for respeitado a condição de que todas foram adquiridas com um nível de maré idêntico, e de preferência coincidente com o nível mínimo da BM; iii) A classificação não supervisionada ("*K-Means*"; considerando 4 classes) foi aplicada à banda derivada NDWI e às bandas espectrais B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B11 e B12; a aplicação do procedimento NDWI ("*K-Means*") permitiu obter uma estimativa mais conservativa, focada na área emersa da barra arenosa, ou conseguir alargar a área a classificar, ao somar à área emersa da barra arenosa a parte da área imersa que estaria coberta por uma reduzida coluna de água (Fig.20; área com cor azul-escuro ou área com a cor roxa). Contudo, no processo de transformação "*raster*" para vectorial, o número de polígonos gerados por vezes era em número elevado, dificultando a identificação de cada um deles e a obtenção da respectiva área; a classificação não-supervisionada ("*K-Means*"; 4 classes) quando aplicada às bandas espectrais B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B11 e B12 revelou resultados semelhantes à classificação NDWI ("*K-Means*"), sendo a classe "Água" descrita de forma mais homogénea permitindo uma melhor delimitação dos contornos das barras arenosas e das restantes classes; tal como se verificou com os resultados da classificação não-supervisionada NDWI ("*K-Means*"), este procedimento mostrou-se sensível à presença de "areia molhada" *versus* "areia seca" ou ainda, a zonas totalmente emersas *versus* imersas por uma reduzida coluna de água.

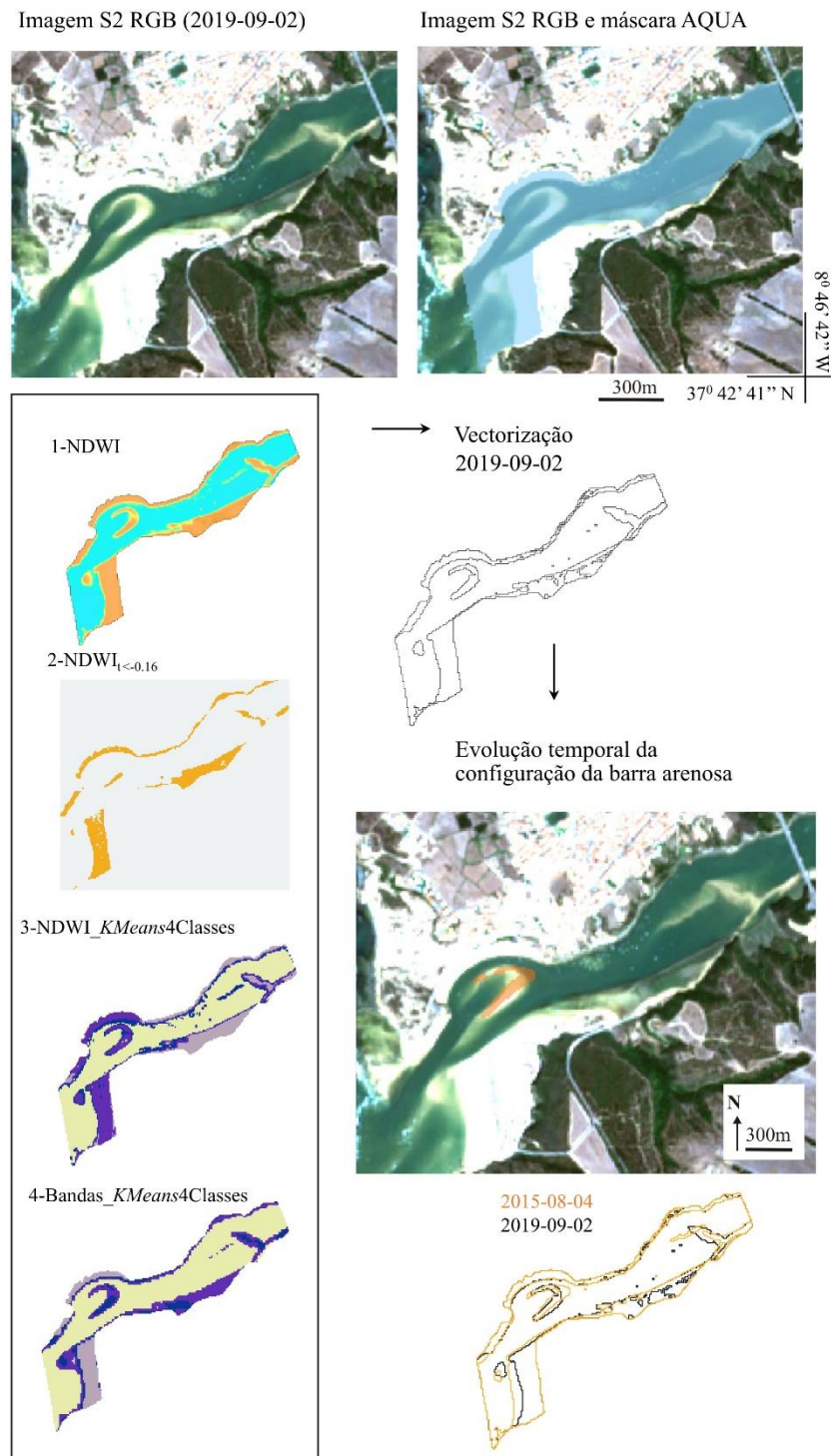


Figura 20- Imagem S2 de 2019-09-02. (1) Determinação do índice NDWI considerando a máscara “AQUA”; (2) Aplicação do limiar do NDWI $\tau=0.16$; (3) Classificação não-supervisionada aplicada à banda derivada NDWI (“K-Means”; 4 classes) e (4) Classificação não supervisionada aplicada às bandas espectrais B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B11 e B12.

II.1.5 - Pós-processamento

O pós-processamento focou-se na obtenção de mapas temáticos que resultaram da determinação de bandas derivadas (NDVI, NDWI e NWI) e em alguns casos, levou à vectorização da classificação não supervisionada (*“K-Means Cluster Analysis”*).

Com o objectivo de melhorar a apresentação geral dos mapas de classificação foi aplicado um filtro de pós-classificação baseado na mediana, e com uma janela de 3×3 píxeis (*“NON- LinearFilters-Median 3×3 ; Filter matrix- quotient:1.0; Kernel offset X; e Y: 1 e Kernel width and height:3”*). Contudo temos de ter em consideração que quando se aplicam filtros (técnicas de pós-classificação) para reduzir a fragmentação espacial das classes (i.e. efeito *“salt and pepper”*) devemos ser muito criteriosos na escolha do tipo e do tamanho do filtro porque este processo pode eliminar áreas constituídas por um pequeno número de píxeis que podem ter sido correctamente classificadas. De facto, vários autores demonstraram que a filtragem na etapa de pós-classificação pode aumentar a precisão dos resultados porque elimina erros causados por píxeis dispostos nos limites das classes (Booth e Oldfield, 1989; *in* Chuvieco, 2016). No entanto, segundo estes autores este método também pode criar erros na classificação de classes que possuem uma representação espacial muito limitada. Para ultrapassar esta dificuldade, estes autores sugerem que algumas classes possam ser excluídas da filtragem ou que alguns polígonos sejam filtrados de acordo com um certo limite espacial. Considerando esta advertência, e sabendo que a área intertidal é de pequenas dimensões, optou-se por realizar uma avaliação à precisão da classificação, usando a imagem *“raster”* não filtrada. Para tal, avançou-se para uma reclassificação da classificação anteriormente obtida com o índice NDVI (*“K-Means”*) porque não era possível fazer a correspondência directa entre os *“clusters”* definidos pelo algoritmo *“K-Means”* e as mesmas classes que caracterizam as zonas localizadas a montante e jusante da ponte sobre o Rio Mira.

Depois de ultrapassada esta etapa e de ser realizada a identificação de cada uma das classes no *raster* de classificação, foi possível elaborar diferentes mapas temáticos. Dado que uma mesma classe pode ser representada por diferentes polígonos que resultaram do processo de transformação do *“raster”* em vectorial, foi necessário

calcular a área de cada um dos polígonos. Esta etapa permitiu que alguns mapas temáticos sejam acompanhados por tabelas que indicam a área de cada uma das classes, obtendo-se uma inventariação detalhada da zona intertidal total estudada (Fig. 19). Os valores de áreas estimados para classe foram comparados com os resultados obtidos recorrendo ao “*Google Earth Pro*”. No caso das barras arenosas, foi possível comparar as estimativas das áreas emersas com os limites das linhas batimétricas obtidas através de levantamentos topo-hidrográficos.

II.1.5.1 – Avaliação dos métodos de classificação

A avaliação da exactidão da classificação foi realizada em ambiente ArcGis usando a ferramenta “*Confusion Matrix*”. Desta forma, foi possível calcular: a Matriz de Confusão (“*Confusion Matrix*”), a Precisão Global (AO), a Precisão do Utilizador (PA), a Precisão do Produtor (UA; “*User and Producer Accuracy*”), e o índice “*Kappa*” (“*Kappa Statistic*”) (Fig. 21). Assumiu-se ainda, que o número de pontos aleatórios (N) corresponde a 1% dos pontos amostrados (número de píxeis).

A base teórica da avaliação da precisão de classificação usada neste trabalho é a mesma que foi aplicada por Chuvieco (2016). De modo sucinto, podemos referir que a Matriz de Confusão reflecte a concordância ou discordância entre a classificação e a informação de referência (“*ground truth*”). Usualmente, as colunas indicam as classes de referência, e as linhas as categorias da classificação. Logicamente, ambas têm o mesmo número de observações e significado; é uma matriz de $n \times n$, onde n é o número de classes (Fig. 21). A diagonal da matriz representa os pontos amostrados sobre os quais existe concordância na sua classificação (resultado da classificação *versus* pontos “*ground truth*”), enquanto os laterais representam erros de classificação. A relação entre o número de píxeis correctamente classificados e o número total de píxeis amostrados, expressam a precisão da classificação do mapa final. A coluna de “*residuals*” inclui os pontos reais que não foram identificados no mapa, enquanto as linhas “*residuals*” identificam os píxeis classificados que não correspondem à realidade, representando, neste caso, os erros de

“*omission*” e de “*comission*”, respectivamente (Aronoff, 1982; Story e Congalton, 1986 in Chuvieco, 2016). A Matriz de Confusão mostra não só a Precisão Global (AO- “*Overall Accuracy*”) do processo de classificação, mas também a precisão de cada classe e os “conflitos” entre classes. Na métrica de validação, a mais simples é a razão entre as células na diagonal (amostras bem classificadas) e o número total de amostra de validação (“*ground truth*”). A Precisão Global (AO- “*Overall Accuracy*”) é definida pela equação 6. Em termos de precisão, existem dois tipos de erros que podem ser relacionados com dois tipos de precisão: Precisão do Utilizador (UA- “*User’s Accuracy*”) e Precisão do Produtor (PA- “*Producer’s Accuracy*”) (Aronoff, 1982; Story e Congalton, 1986 in Chuvieco, 2016).

		Ground truth points					
Classification		Class 1	Class 2	Class 3	Class n	Total	User's accuracy
	Class 1	X_{11}				X_{1+}	X_{11}/X_{1+}
	Class 2		X_{22}			X_{2+}	X_{22}/X_{2+}
	Class 3			X_{33}		X_{3+}	X_{33}/X_{3+}
	Class n				X_{nn}	X_{n+}	X_{nn}/X_{n+}
	Total	X_{+1}	X_{+2}	X_{+3}	X_{+n}	ΣX_{ij}	
	Producer's accuracy	X_{11}/X_{+1}	X_{22}/X_{+2}	X_{33}/X_{+3}	X_{nn}/X_{+n}		

Figure 21- Estrutura de uma Matriz de Confusão (“*Confusion Matrix*”), adaptado de Chuvieco (2016).

$$\widehat{OA} = \frac{\sum_{i=1,n} x_{ii}}{\sum_{i=1,n} \sum_{j=1,n} x_{ij}} \quad [\text{eq.6}]$$

Onde X_{ii} corresponde à diagonal de cada coluna; X_{ij} corresponde a qualquer célula da matriz de confusão.

$$\hat{k} = \frac{n \sum_{i=1,n} X_{ii} - \sum_{i=1,n} X_{i+} X_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1,n} X_{i+} X_{+i}} \quad [\text{eq.7}]$$

n corresponde ao tamanho da amostra;

X_{ii} indica a concordância observada, o produto da linha e coluna total (X_{i+} , X_{+i}) estima a concordância esperada para cada categoria i .

A Precisão do Produtor (PA- “*Producer’s Accuracy*”) analisa, para cada classe, o número de píxeis correctamente classificados, e compara-os com todos os píxeis da classe “*ground truth class*”. A Precisão do Produtor mede a probabilidade que o processo de classificação tem de classificar um *píxel* que está numa área de validação de uma determinada classe, nessa classe.

A Precisão do Utilizador (UA- “*User’s Accuracy*”) calcula o número de píxeis correctamente identificados numa dada classe do mapa, e compara-os com todos os píxeis dessa classe na imagem classificada. A Precisão do Utilizador mede a probabilidade de um *píxel* realmente pertencer a uma determinada classe, quando o processo de classificação classificou esse píxel, nessa classe.

O índice “*Kappa*” (“*Kappa Statistic*”; p. 399, *in* Chuvieco) compara a concordância entre o mapa e as classes de referência removendo o efeito dos factores aleatórios. O cálculo do índice “*Kappa*” pode ser obtido usando a equação 7 (Hudson e Ramn, 1987, *in* Chuvieco, 2016). Um valor de $K=1$ indica uma total concordância entre o mapa e os pontos de referência (“*ground truth*”), enquanto valores próximos de zero sugerem que a concordância observada é devida a efeitos aleatórios. Um valor K negativo revela uma classificação insatisfatória devido a outros factores, tais como o tamanho da amostra.

II.1.6 – Processamento das imagens Landsat 5 TM (1986-2010) no “*Google Earth Engine*” (GEE)

Com o propósito de descrever o padrão evolutivo das classes que descrevem a parte terminal do estuário do Rio Mira, entre a foz do rio e o lugar da Cerca, recorreu-se à metodologia desenvolvida por Laengner et al. (2019, 2020). O fluxograma da Figura 14 (3) mostra que este método utiliza o catálogo de dados Landsat 5 TM que está disponível na plataforma “*Google Earth Engine*” (GEE). O “*script*” que resume a metodologia e que permite a utilização da consola do “*GEE*” (Anexo I) está acessível como suplemento (section 2.1 e 2.4) em Laengner et al. (2019) e foi aperfeiçoado em Laengner et al. (2020). De uma forma resumida, a metodologia aplicada por Laengner et al. (2019, 2020) obedece às seguintes etapas: i) numa primeira etapa realiza-se uma classificação onde a zona estuarina é dividida em 3 classes: o sapal (*saltmarsh*) que corresponde à zona intertidal vegetada; o raso de maré (e.g. “*mudflat*”) sem “ervas marinhas” e que inclui zonas cobertas por sedimentos finos (silte e argila) e/ou cobertas por areia (e.g. “*sandflat*”); e a água (e.g. “*open water*”) representando a zona que está sempre imersa independentemente do nível da maré (Fig. 22); ii) Segue-se uma segunda etapa com a aplicação da árvore de decisão não supervisionada baseada no limiar do índice $NDVI_{\tau>0.3}$, que foi escolhido com o objectivo de excluir as áreas de raso de maré cobertas por algas na definição da classe sapal; posteriormente usa o limiar $NDWI_{\tau>0}$ para definir a classe “água”; uma vez que a classificação é baseada na selecção de imagens de 3 anos consecutivos (“*time step*”), a classificação final de cada classe vai depender da aplicação de limiar de frequência ($>20\%$ ou $>85\%$), i.e., quando um píxel é classificado como sapal quer dizer que em mais de 20% das imagens classificadas dos 3 anos considerados, esse píxel obteve essa classificação; iii) Na terceira etapa é calculado o índice NDWI para os píxeis que não foram classificados como “sapal”; os píxeis são classificados com “água” se cumprirem o limiar $NDWI_{\tau>0}$, e se tiverem sido classificados como “água” em mais de 85% das imagens classificadas e seleccionadas para o grupo de 3 anos (“*three-year time step*”); e por fim, iv) na quarta etapa, os restantes píxeis que correspondem à zona intertidal sem cobertura vegetal são classificados como “raso de maré” (Fig. 22B).

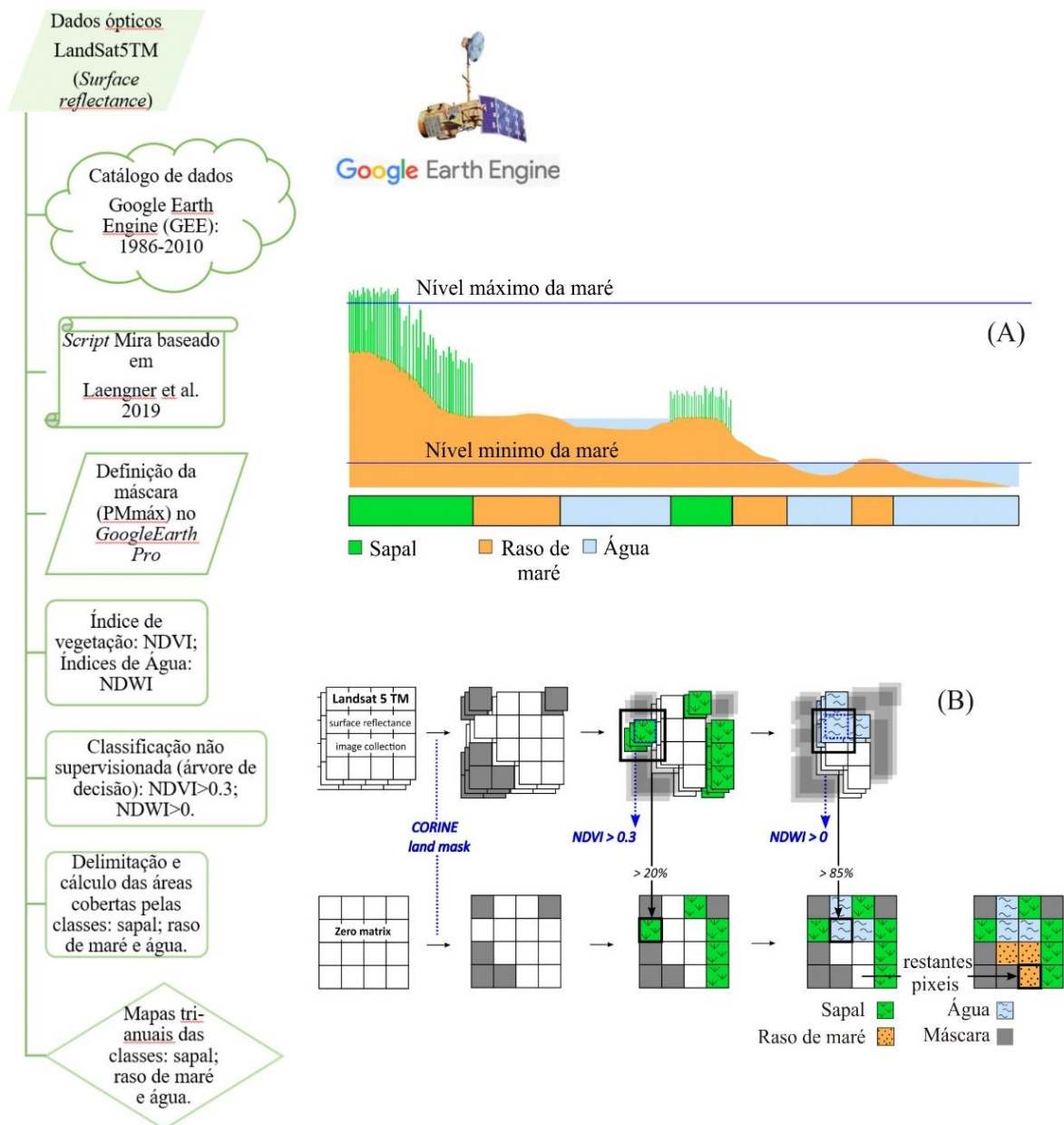


Figure 22- Metodologia de Laengner et al. (2019, 2020): A- Modelo da área estuarina baseada em três classes: Sapal (“salt marsh”); Raso de Maré (“Mud Flat”) e Água (“Water”) e o nível da água associado à oscilação da maré: HAT- “Highest Astronomical Tide”; LAT- “Lowest Astronomical Tide”; B- Árvore de decisão não supervisionada, baseada na aplicação dos limiares dos índices $NDVI_{t>0.3}$ e $NDWI_{t>0}$ (adaptado de Laengner et al., 2019, 2020).

No caso da zona do estuário do Rio Mira aqui estudada, foi decidido que o “*script*” de Laengner et al. (2019; 2020) teria que ser ajustado, tendo sido por isso considerada como máscara o que inclui a zona intertidal e o canal estuarino permanente ($\approx 3.14 \text{ km}^2$; Fig. 17) usando uma imagem adquirida durante a BM de “Marés-Vivas”. No método desenvolvido por estes autores não se tem em consideração o nível da maré de cada uma das imagens classificadas, baseando-se a classificação destes autores na frequência com que um píxel é classificado como sapal ou como “água” no total das imagens consideradas para os três anos analisados. Por ter sido delimitada a máscara da zona intertidal não foi necessário recorrer aos dados “CORINE Land Cover” (CLC2012) para obter a máscara “CORINE Land Mask” que exclui a vegetação terrestre, condição que é descrita como essencial no “*script*” de Laengner et al. (2019, 2020; ANEXO I).

Capítulo III. Resultados e discussão

III.1- Análise geomorfológica e geológica do estuário do Rio Mira

De modo a descrever as principais características geomorfológicas da região do SW Alentejano onde se localiza o estuário do Rio Mira foi realizada uma análise da topografia em ambiente ArcGis. Depois de definidas as principais formas de relevo, procurou-se relacioná-las com a informação geológica que existe disponível para a região que se estende entre Vila Nova de Milfontes, Cercal e São Luís, tendo sido usada neste caso, a Carta Geológica de Portugal na escala 1:200 000.

III.1.1- Modelo Digital de Terreno e representação tridimensional “hillshade”

Ao analisarmos o Modelo Digital de Terreno (MDT) que foi criado para a região de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís destacamos o elemento do relevo com cotas mais elevadas (i.e. Serra do Cercal) que se prolonga por 18 km segundo NNW-SSE a nordeste e a leste do Rio Mira (Fig. 23). Este relevo montanhoso, onde predominam altitudes superiores a 100-200 m, é em parte interrompido no seu extremo meridional, em São Luís, por um alinhamento com direcção ENE-WSW.

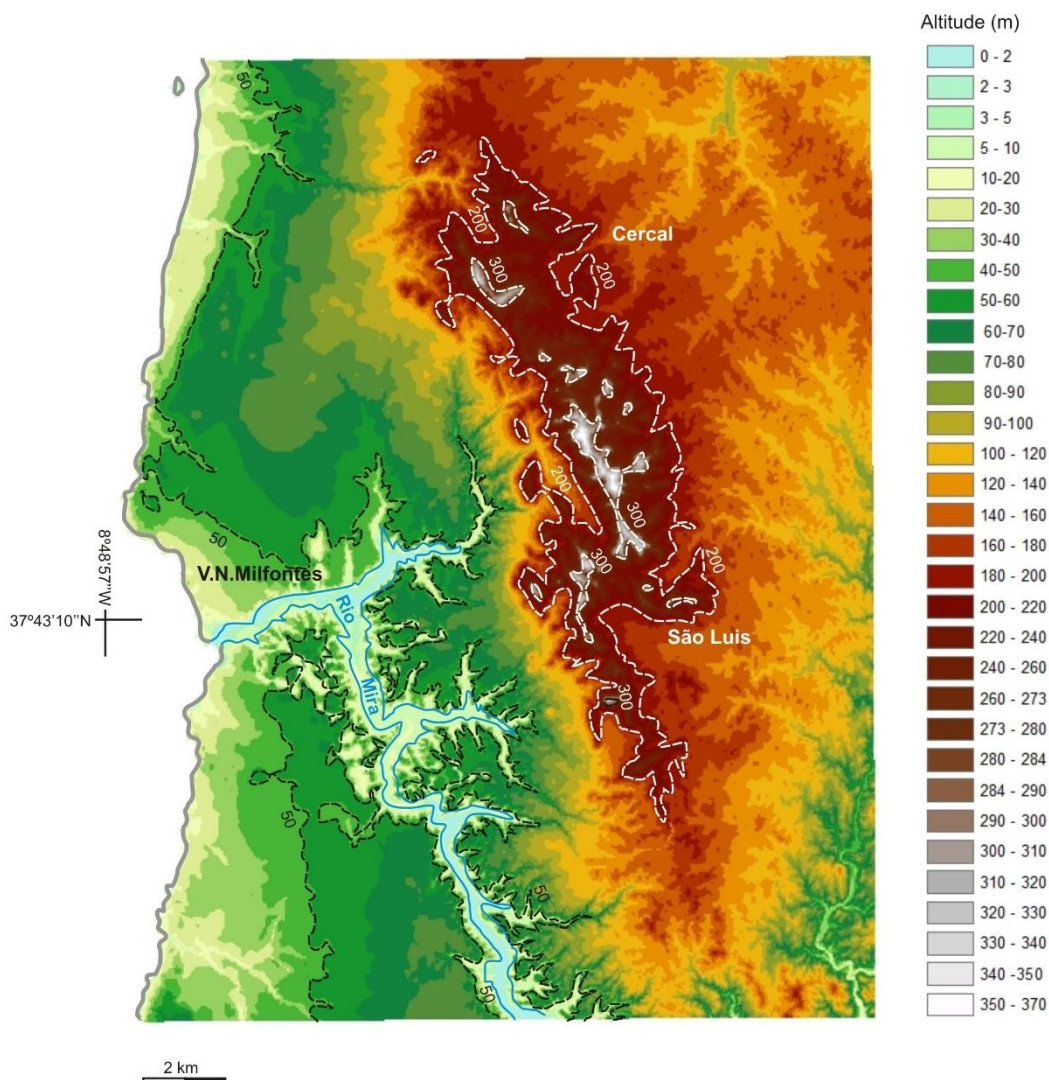


Figure 23- MDT da área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís.

Também se realça que a vertente ocidental Serra do Cercal, que está limitada pela planície litoral que se estende até Vila Nova de Milfontes, é mais abrupta que a vertente oriental onde se localiza o Cercal, e que assinala em parte o limite com a bacia hidrográfica do Rio Sado. Na planície litoral, observa-se que a Norte de Vila Nova de Milfontes existe um alinhamento NE-SW marcado pela curva de nível dos 50 m, que passa a ter orientação NW-SE quando nos deslocamos no sentido do estuário do Rio Mira. Na margem meridional do Rio Mira, a curva de nível dos 50 m segue o rumo NNW-SSE, que é aproximadamente paralelo a grande parte do traçado do Rio Mira, e também coincide com a direcção principal da Serra do Cercal.

Com o objectivo de complementar a descrição das formas do relevo usou-se a ferramenta “*hillshade*” do ArcGIS que cria imagens essenciais para desenvolver uma análise da representação tridimensional na escala de cores cinzenta (Fig. 24). Esta análise do relevo permitiu reconhecer um conjunto de alinhamentos topográficos na paisagem, que estão essencialmente localizados na Serra do Cercal, ao longo do litoral, e do traçado do Rio Mira (Fig. 24).

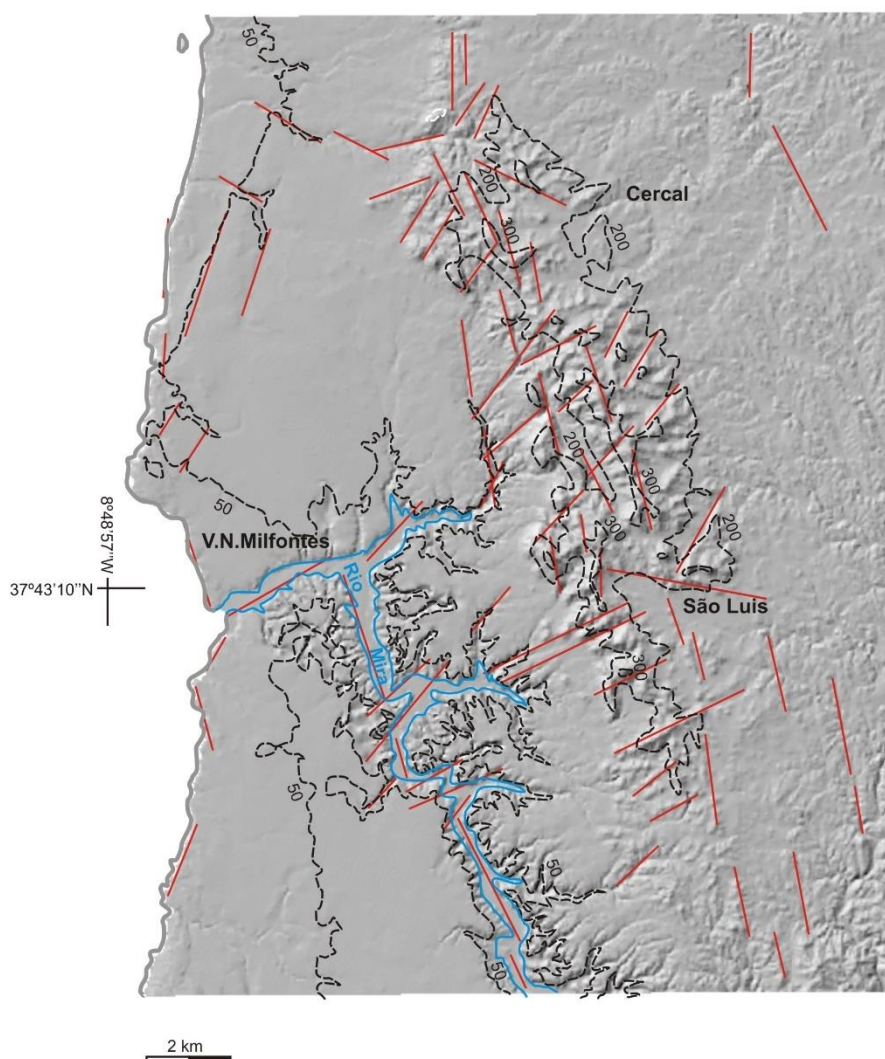


Figura 24- Representação tridimensional na escala de cores cinzenta “hillshade” da área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís; linhas a vermelho indicam os principais alinhamentos definidos à superfície; linha a azul representa o Rio Mira.

No relevo definido pela Serra do Cercal, que têm orientação NNW-SSE e que acompanha curva de nível dos 200 m, observam-se alinhamentos NNW-SSE e N-S, e outros segundo as direcções NE-SW e ENE-WSW, e NW-SE e WNW-ESE. Por outro lado, o traçado da linha de costa é definido por alinhamentos N-S, NNW-SSE e NE-SW que definem as arribas. Por último, ao longo do traçado do Rio Mira podemos reconhecer alinhamentos topográficos segundo NNW-SSE e ENE-WSW.

Em síntese, a análise da informação geomorfológica acima descrita sugere que existe um controle da Geologia (i.e. tipos de rochas com diferentes graus de resistência à erosão e/ou falhas responsáveis pela movimentação de blocos de crosta) no desenvolvimento da grande maioria das formas de relevo observadas na região alvo deste estudo, incluindo a influência sobre o traçado irregular do Rio Mira.

Ao projectarmos no mapa geológico simplificado que abrange a região de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís, verifica-se que as curvas de nível dos 50, 200 e 300 m, permitem reconhecer como principais formas de relevo: a plataforma litoral, a Serra do Cercal e o vale onde se encaixou do Rio Mira (Fig. 25). A plataforma litoral corresponde à mancha ocupada pelos depósitos sedimentares do Plio-Quaternário, enquanto na Serra do Cercal e no vale do Rio Mira são as rochas mais antigas paleozóicas que afloram. As rochas paleozóicas também afloram ao longo da arriba que geralmente apresenta no seu topo as rochas sedimentares plio-quaternárias que assentam em discordância sobre as mais antigas do Carbónico.

Por outro lado, na Serra do Cercal pode observar-se que são as rochas meta-vulcânicas devónicas do Complexo Vulcano-Silicioso do Cercal, que apresentam um elevado grau de resistência à erosão, que definem este relevo de dureza com direcção NNW-SSE, seguindo a configuração da curva de nível dos 300 m (Fig. 25). Quanto à distribuição dos afloramentos de rochas meta-sedimentares Carbónicas que são menos resistentes à erosão (i.e. meta-pelitos e meta-psamitos da Formação de São Luís), verifica-se se ocupam as zonas com menor altitude, da planície litoral e da vertente leste da Serra do Cercal.

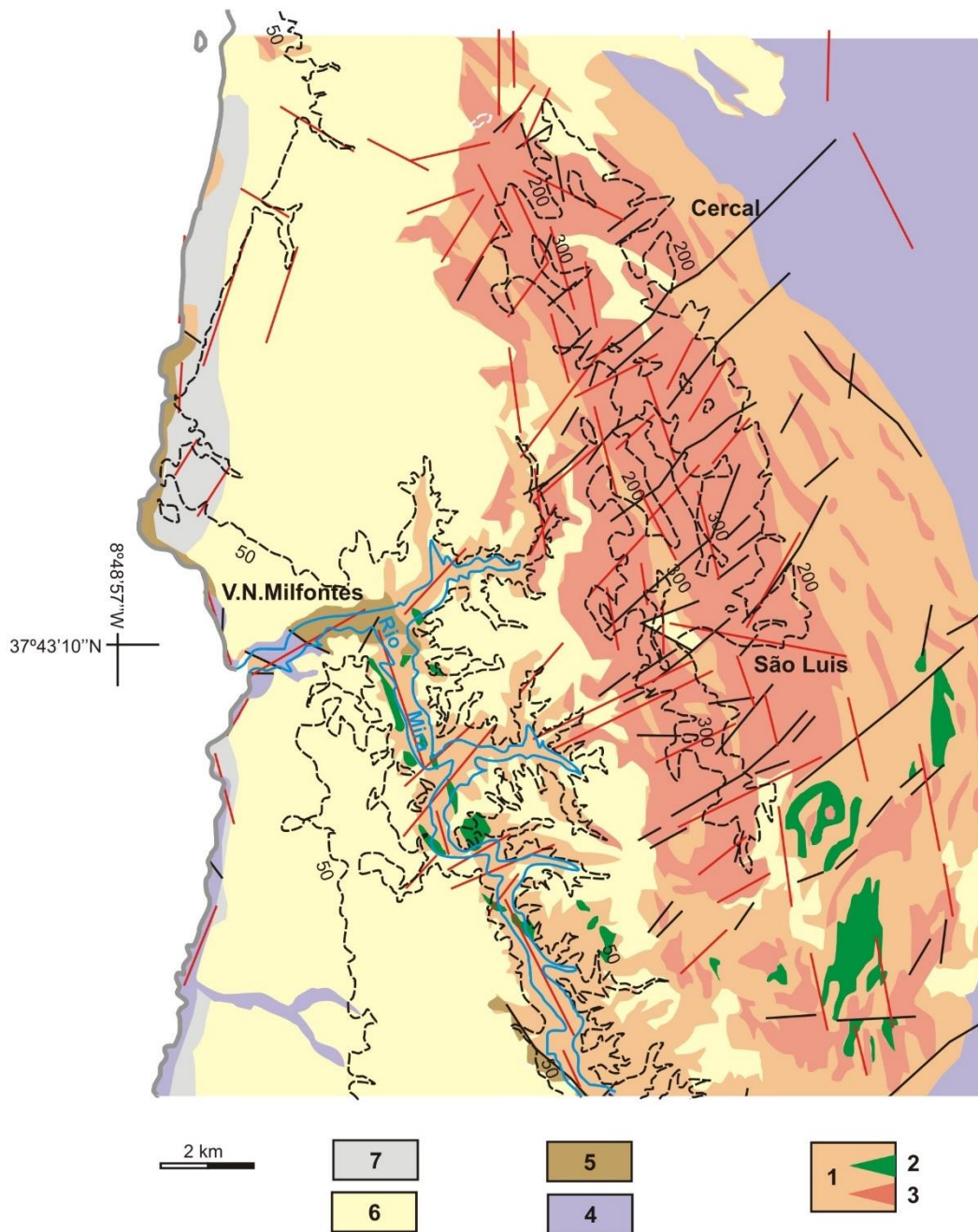


Figura 25- Mapa geológico simplificado da área de estudo de Vila Nova de Milfontes-Cercal- São Luís (adaptado de Oliveira, 1984); A legenda é igual à da figura anterior; Note-se a sobreposição das curvas de nível dos 50, 200 e 300m (linhas a tracejado a preto) e os principais alinhamentos definidos à superfície através da representação tridimensional na escala de cores cinzenta “hillshade” (linhas a vermelho); linha a azul representa o Rio Mira.

Ao sobrepor a informação geomorfológica e geológica também podemos destacar que as falhas representadas no mapa geológico coincidem com alinhamentos definidos pela análise do modelo tridimensional na escala de cores cinzenta “*hillshade*”. Torna-se evidente que as falhas com direcção NE-SW e WSW-ESE, que atravessam a Serra do Cercal, se prolongam para Oeste pela plataforma litoral. Este sistema de falhas também está espacialmente associado aos meandros que caracterizam o troço NNW-SSE do Rio Mira, bem como o rumo que toma este curso de água nos últimos 3.5 km do seu estuário até atingir a foz em Vila Nova de Milfontes.

Considerando uma visão de âmbito mais regional do contexto tectónico actual que envolve esta região de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís e o seu prolongamento até à nascente do Rio Mira na Serra do Caldeirão, podemos constatar que: i) o troço orientado WSW-ENE nos últimos 3.5 km do Rio Mira, bem como as falhas com a mesma direcção que cortam a Serra do Cercal, surgem paralelas a um importante sistema de falhas localizado mais a leste (i.e. Falha de Messejana); e que ii) o sistema de falhas com orientação WSW-ENE se prolonga para sudoeste do Rio Mira (i.e. Falha de São Teotónio-Odemira) ao longo do “*Horst*” de Carregoussal-São Teotónio (Feio, 1951; Ramos Pereira, 1990). Esta importante estrutura com centenas de km de comprimento que está orientada segundo NE-SW a NNE-SSW estende-se até ao fosso de Aljezur (Pimentel e Amaro, 2000; Figueiredo, 2015), como resultado do processo de escalonamento da antiga planície litoral provocado pelo movimento de vários blocos de crosta delimitados por falhas (Ramos Pereira, 1990, 1994); o sistema de blocos do tipo “*horst-graben*” que se estende de São Teotónio a Aljezur é controlado por falhas do tipo desligamento esquerdo (Cabral, 2012) cujo movimento activa o levantamento e subsidência de blocos de crosta durante o Plio-Quaternário. Por sua vez, o troço do Rio Mira com orientação NNW-SSE que se mantém por 12.5 km na região de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís, parece corresponder à extensão para Noroeste da Falha de São Marcos da Serra-Quarteira, sugerindo que o encaixe deste curso de água também é controlado por esta falha do tipo desligamento direito (Cabral et al., 2017; Dias e Cabral, 2002) (Fig. 26).

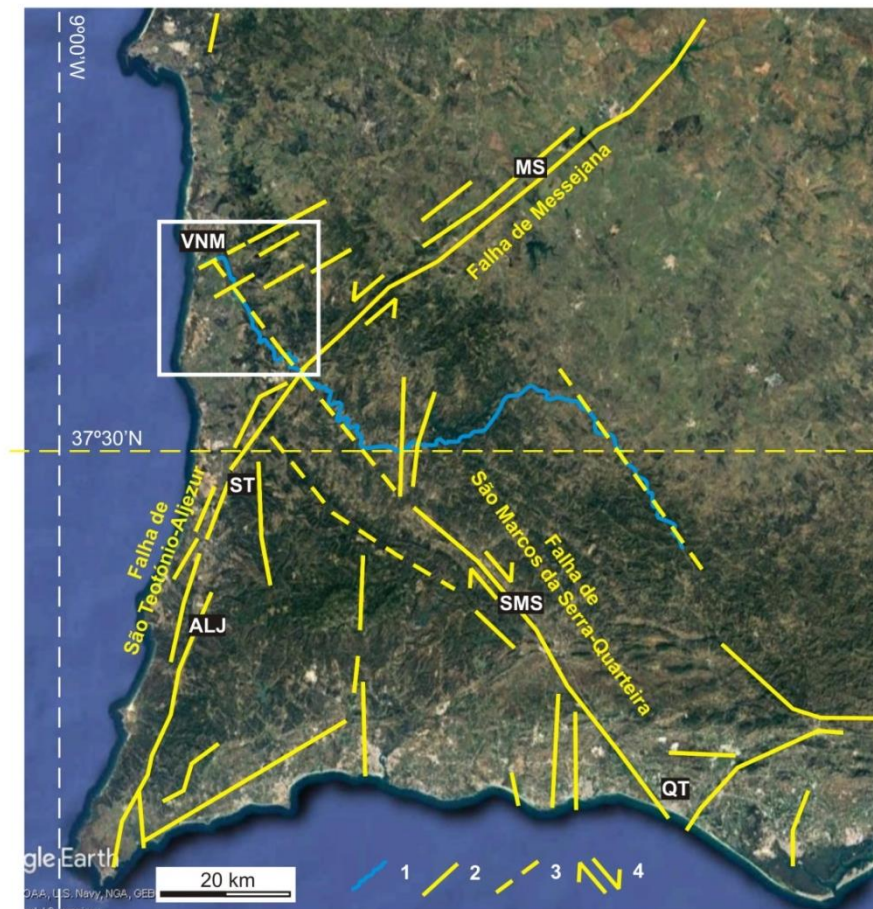


Figura 26- Localização da área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís (quadrado com limite a branco) no sudoeste de Portugal (Excerto de imagem do Google Earth), assinalando as principais falhas plio-quaternárias (adaptado de Dias e Cabral, 2002; Cabral et al., 2017); (1)- traçado do rio Mira; (2), falha; (3)- Falha provável; (4)- Movimento de blocos na falha do tipo desligamento; localidades: ALJ- Aljezur, MS- Messejana, QT- Quarteira, SMS- São Marcos da Serra, ST- São Teotónio, VNM- Vila Nova de Milfontes.

Em síntese, através da análise conjunta das diferentes formas do relevo (i.e. arriba, antiga planície litoral, serra e traçado do rio) e da informação geologia (i.e. litologias e falhas) pode afirmar-se que: i) a Serra do Cercal, que se destaca da planície litoral, é principalmente constituído pelas rochas devónicas mais resistentes à erosão (i.e. representa um relevo de dureza); ii) O traçado irregular do estuário do Rio Mira está

essencialmente condicionado pelos sistemas de falhas com orientação NNW-SSE no troço mais a sul, e ENE-WSW na parte terminal junto à foz; iii) O curso do Rio Mira na sua parte terminal está encaixado numa antiga planície litoral (i.e. plio-pleistocénica), desenvolvida sobre rochas meta-sedimentares do Carbónico, menos resistentes à erosão, que está escalonada em distintos patamares por efeito do movimento de blocos de crosta limitados por falhas recentes; e iv) Alguns dos meandros observados no troço orientado NNW-SSE do Rio Mira parecem estar controlados por falhas com orientação ENE-WSW e NE-SW.

III.2- Limites das principais UMFS do estuário do Rio Mira

A identificação e caracterização da parte terminal do estuário do Rio Mira permitiram definir diferentes Classes/UMFS a montante e a jusante da ponte que atravessa este curso de água (Fig.11). A génese das diferentes unidades morfossedimentares (UMFS) encontradas neste estuário é controlada por processos morfodinâmicos que evoluem no tempo e no espaço. Estes processos morfodinâmicos dependem da propagação da onda de maré dinâmica (amplitude da maré) e das correntes de “enchente” e de “vazante” por ela geradas, e ainda, da entrada de água salina que acompanha a onda de maré, gerando gradientes de salinidade ao entrar em contacto com a água de baixa salinidade que constitui o caudal do rio, influenciando as taxas de sedimentação no interior do estuário. Todos esses factores são, por sua vez condicionados pela largura e pela profundidade do leito do rio, características que determinam a morfologia do canal de escoamento. Outro aspecto importante a ter em consideração quando se estudam zonas estuarinas é que a interacção dos diferentes factores tem um importante reflexo na distribuição das diferentes UMFS, e no tipo de cobertura sedimentar superficial que caracteriza a zona intertidal. Nas imagens de satélite S2 que coincidem com o pico da baixa-mar (BM), observa-se que os sedimentos mais grosseiros (areia e silte) são mais abundantes no troço do Rio Mira a jusante da ponte, constituindo as praias estuarinas e as dunas adjacentes, as barras arenosas e as zonas de raso de maré

onde a fracção da areia é relativamente mais importante que a fracção silto-argilosa. Por sua vez, a montante da ponte, é notório que a quantidade de sedimentos mais grosseiros diminuiu de forma muito significativa, dominando os sedimentos silto-argilosos.

Outra dimensão que é importante analisar, se pretendemos compreender o padrão evolutivo de um estuário, diz respeito às escalas temporais e espaciais distintas dos processos sedimentares. Em condições naturais (i.e. sem a intervenção humana) a variação da morfologia de uma barra arenosa que se pode observar à escala diária, não pode ser comparada com o padrão de sedimentação de um sapal que pode representar várias décadas de deposição de sedimentos finos. Neste estudo é analisado um exemplo de interferência antrópica na dinâmica sedimentar de um estuário, o do Rio Mira. A barra arenosa que se estende em frente à Praia da Franquia, perto da foz do Rio Mira, foi dragada em Junho e Julho de 2017, e esse volume de sedimentos grosseiros serviu para realimentar essa praia estuarina, e também a Praia das Furnas. Esta intervenção antrópica está registada com dados topo-hidrográficos e é possível de ser analisada a partir de imagens de satélite Sentinel-2 (S2) que foram adquiridas durante o pico da BM. Esta informação revelou-se fundamental para proceder à monitorização do processo sedimentar de reconstrução da barra arenosa, que descreve o novo equilíbrio morfodinâmico na zona distal do estuário. Com este propósito foram estudadas 14 imagens de satélite S2 da zona a jusante da ponte sobre o Rio Mira, às quais se juntaram outras 3 imagens (S2-Anexo I) cobrindo a zona a montante da ponte.

A metodologia empregue na delimitação da zona intertidal da área de estudo é descrita em II.1.4, e ilustrada no fluxograma metodológico da Figura 14. Com o objectivo de caracterizar as principais UMFS que se observam na zona intertidal do estuário do Rio Mira, optou-se por adaptar a metodologia de Calleja et al. (2017; Fig. 18) que tem em consideração a presença de “ervas marinhas” como a *Zostera spp.* a cobrir o raso de maré. Por essa razão, foram introduzidos alguns ajustes na metodologia à medida que se desenvolvia a análise comparativa dos resultados das bandas derivadas NDVI, ACP, NWI e NDWI usadas para delimitar definir os limites das diferentes UMFS. As distintas fases de aplicação da metodologia e da obtenção dos resultados consistiram num processo iterativo e contínuo que aqui se apresenta por etapas para facilitar a sua apresentação e leitura.

A determinação do índice de vegetação NDVI revelou-se de extrema importância na caracterização da zona intertidal, à semelhança do se aplicou noutros trabalhos de caracterização de zonas estuarinas (Fast, 2017; Donchyts et al., 2016; Murray et al., 2012; 2018; Calleja et al., 2017, 2019). O padrão de distribuição do índice NDVI sobre a totalidade da zona intertidal é apresentado na Figura 27. Nesta figura podemos destacar que os valores mais elevados do índice NDVI se concentram a montante da ponte sobre o Rio Mira, onde predominam as áreas de sapal cobertas por vegetação halófitas. A jusante da ponte, o índice NDVI só apresenta valores elevados (0.45) nos locais onde existem pequenas “manchas” de sapal, onde as “ervas marinhas” cobrem o raso de maré ou em zonas de vegetação dunar de características mais arbustivas.

Face a estes resultados, foi possível delimitar zonas distintas de sapal através da aplicação dos limiares $NDVI_{\tau=0.2}$ e 0.3 essenciais para estabelecer um padrão distinto ao comparar a zona intertidal junto à foz (Fig.11) com a zona a montante da ponte onde predominam as áreas de raso de maré e de sapal (*sensu lato*).

De acordo com os resultados da aplicação do limiar $NDVI_{\tau=0.2}$, a zona intertidal pode ser separada em duas áreas com cobertura sedimentar distintas: i) pelo “complexo da foz e baía”; $NDVI_{\tau \leq 0.2}$; Fig. 28), que está maioritariamente coberto por sedimentos mais grosseiros (areia e silte), que constituem as classes praia estuarina e o campo dunar adjacente; e ii) pela área “a montante da baía” onde já existe cobertura vegetal (“ervas marinhas” e/ou vegetação halófitas), e que corresponderá à designação “vegetated area” de Calleja et al. (2017).

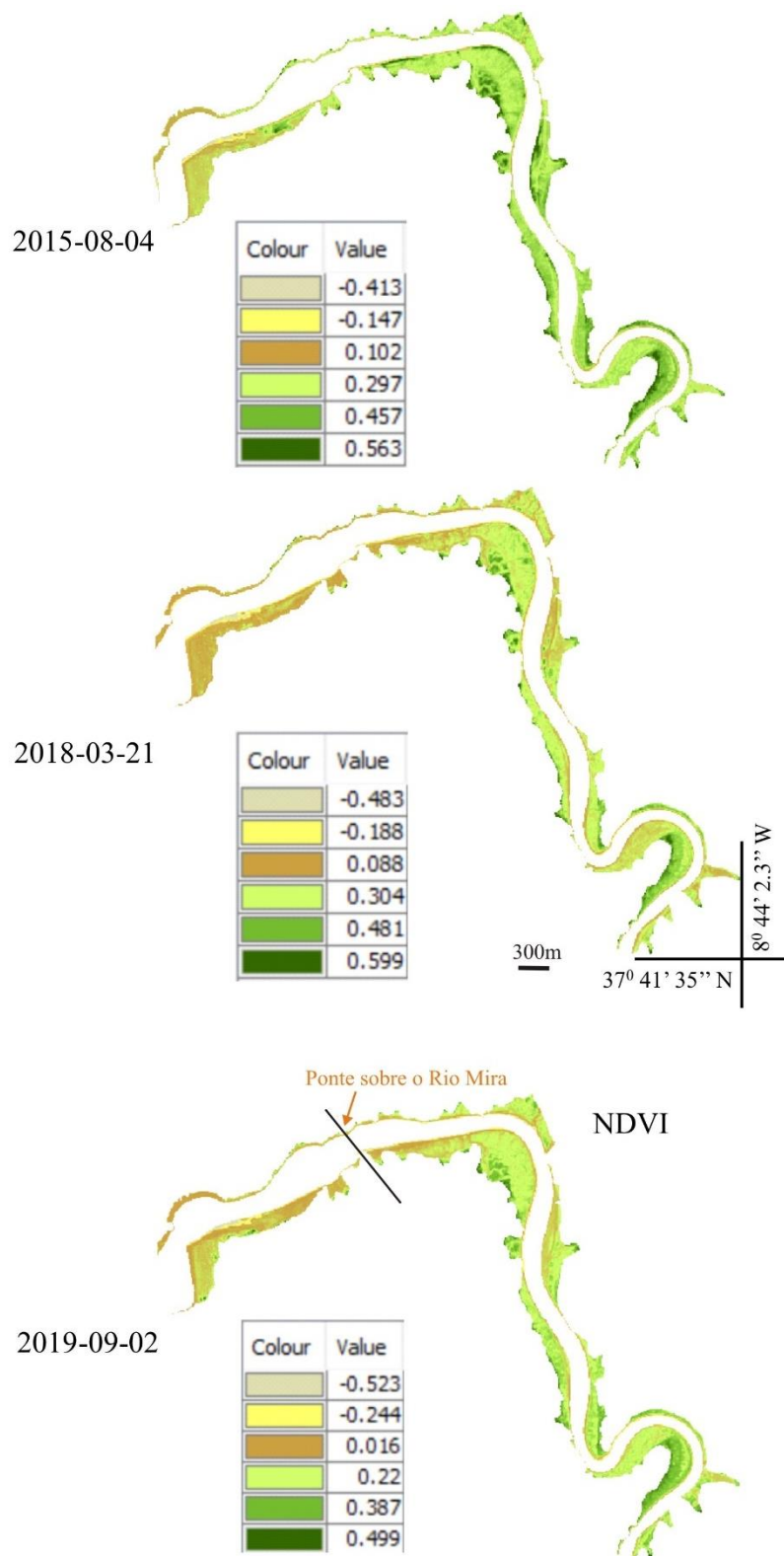


Figura 27- Mapa dos valores do índice NDVI na zona intertidal para as três imagens estudadas (2015, 2018 e 2019).

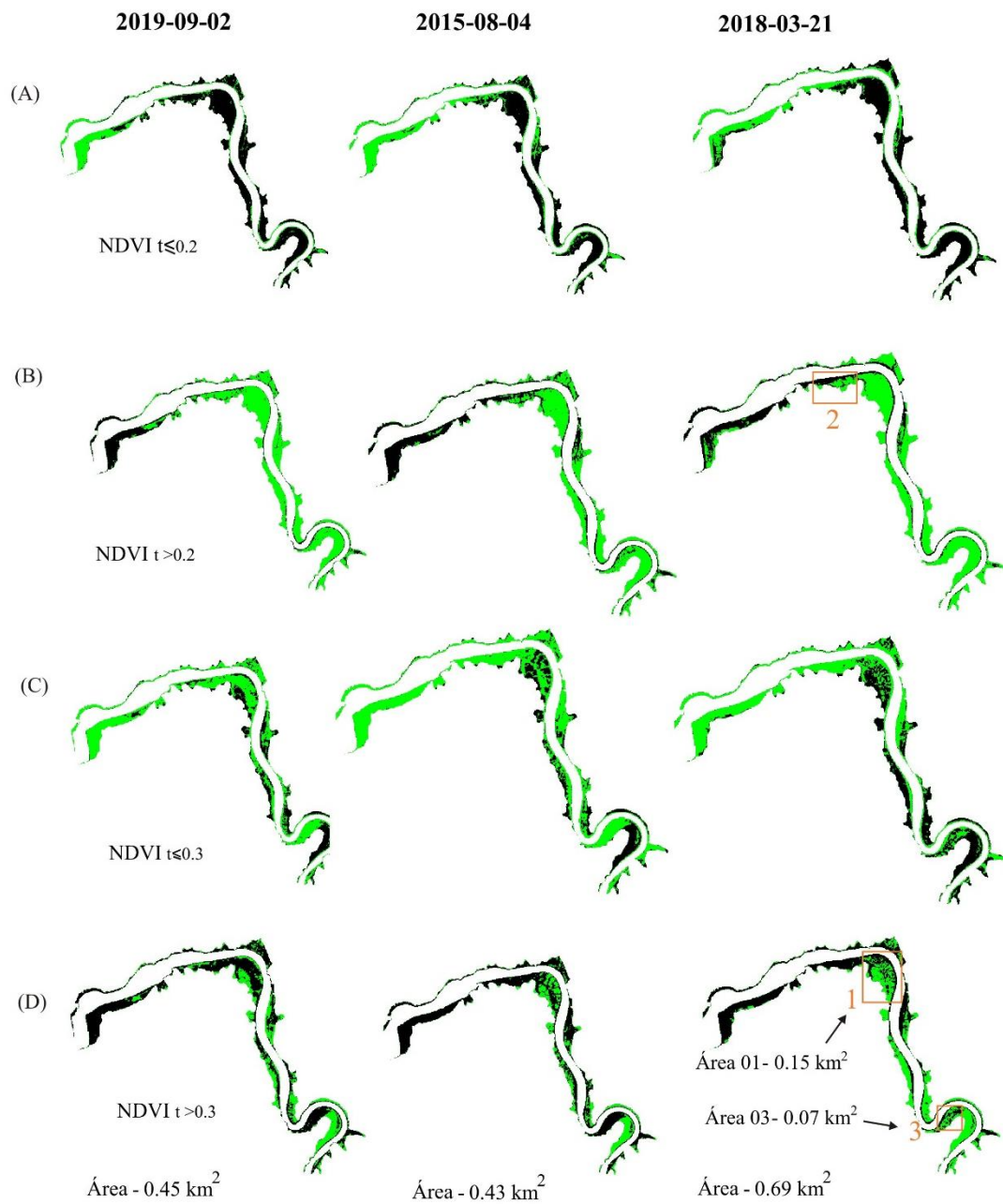


Figura 28- Mapa relativo à aplicação dos limiares do $NDVI_{t=0.2; 0.3}$ para as 3 datas estudadas (2015, 2018 e 2019). Áreas 1, 2 e 3.

Com esta abordagem, verificou-se que a área intertidal delimitada pelo limiar $NDVI_{\tau>0.2}$ é demasiado extensa e pouco útil na delimitação das UMFS a montante da ponte, onde estão localizadas as principais áreas de sapal (*sensu lato*), de raso de maré e de canais de maré, total ou parcialmente cobertos por “ervas marinhas”. Por outro lado, a aplicação do limiar $NDVI_{\tau>0.3}$, permitiu delimitar, embora sem grande rigor, as áreas do alto sapal, do raso de maré com elevada cobertura de “ervas marinhas”, e ainda, de parte do médio sapal (Fig. 28). Apesar da relevância dos resultados, a variabilidade nas áreas delimitadas pelo limiar $NDVI_{\tau>0.3}$, mesmo quando aplicado a imagens de anos diferentes e que correspondem a meses em que a vegetação se encontra no mesmo estágio fenológico (Fig. 28), permitiu verificar que podem ser sub ou sobrevalorizadas áreas que estão cobertas por sapal, em particular naquelas que estão localizadas na margem sul do Rio Mira (áreas 1 e 2 na margem sul Montalvo; e a área 3 no Corgo da Ponte Quebrada (Fig. 28 B e D).

Para melhorar o grau de diferenciação das diferentes áreas procedeu-se à análise de componentes principais (ACP), considerando as bandas espectrais (B2, B3, B4; B8 e B11), seguindo a metodologia de Calleja et al. (2017) (Fig. 18). Estes autores aplicaram o limiar $PC^*>0$ ou ≤ 0 , para distinguir as zonas cobertas pelas classes de vegetação: “Saltmarshes” (Sapais), “Seagrasses” (“Ervas marinhas” em particular a *Zostera*) e “other vegetation” (“outro tipo de vegetação”). Os valores próprios (“Eigenvalues”) da análise de componentes principais (ACP01 a ACP04) para cada uma das imagens Sentinel-2 estudadas (2015-08-04; 2018-03-21 e 2019-09-02) são apresentados no Anexo III. Os resultados da aplicação dos limiares $ACP>0$ e $ACP\leq 0$ (Calleja et al., 2017), são apresentados na Figura 29, e comparados com os resultados obtidos através da aplicação dos limiares $NDVI_{\tau=0.2}$ e 0.3 .

A análise comparativa dos resultados obtidos permite concluir que: i) a área classificada pela $ACP01\leq 0$ é muito idêntica à que resulta da aplicação do limiar $NDVI_{\tau>0.2}$; ii) a $ACP01>0$ não reflecte um padrão de distribuição das classes na zona intertidal; iii) a $ACP02>0$ delimita a área de sapal (*sensu lato*) a montante da ponte, e o campo dunar da Praia das Furnas localizado a jusante; iv) a $ACP02\leq 0$ delimita *grossa modo* as áreas de raso de maré e a praia estuarina da Franquia; e v) a ACP03 apresenta um padrão muito idêntico ao descrito para o índice NDVI a montante da ponte, caso se

considere o limiar do NDVI superior a 0.3. A condição, $ACP03 \leq 0 \approx NDVI_{\tau > 0.3}$, delimita as classes alto sapal e de raso maré (com elevada cobertura de “ervas marinhas”) e condição, $ACP03 > 0 \approx NDVI_{\tau \leq 0.3}$, delimitam as classes de sapal (*sensu lato*) e a classe raso de maré (com baixa cobertura de “ervas marinhas”).

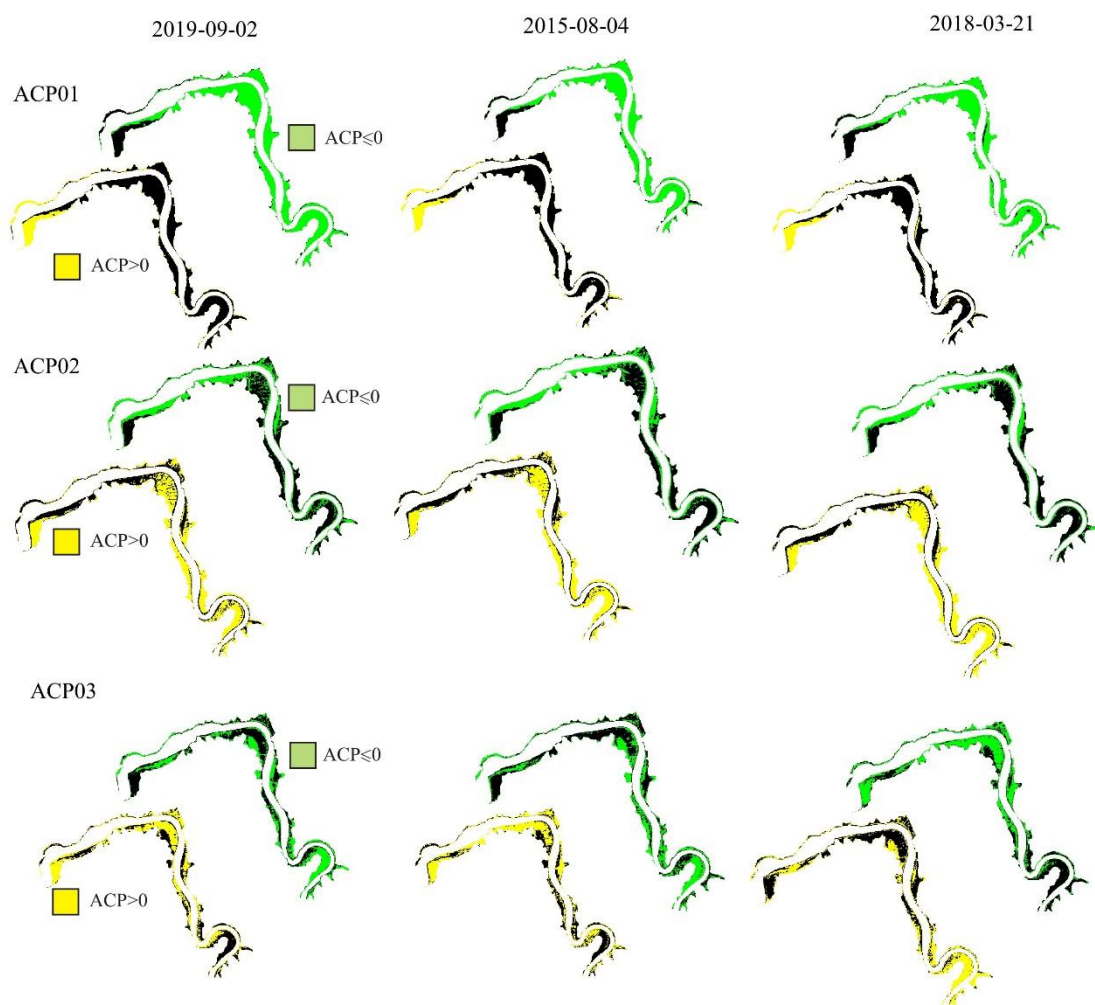


Figura 29- Análise comparativa das três primeiras componentes obtidas pela ACP das bandas espectrais B2, B3, B4, B8 e B11.

É importante referir que na imagem de satélite de 2018-03-21, que reporta uma elevada percentagem de sedimentos finos em suspensão no Rio Mira (Fig. 10), com a particularidade de se reconhecer a formação de uma pluma túrbida em direcção ao mar, a

componente 3 superior a zero ($ACP03 > 0$) define uma área que é simétrica daquela que foi estabelecida nas restantes imagens das datas que foram analisadas (2015-08-04 e 2019-09-02), sendo por isso mais selectiva. Nota-se ainda que a montante da ponte sobre o Rio Mira, é possível distinguir áreas que se encontram cobertas por alto e médio sapal, e as zonas de raso de maré com elevada cobertura de “ervas marinhas” (Fig. 29). Este resultado inesperado pode ser justificado pelo possível efeito do aumento da reflectância na B8 (NIR) que poderá ter sido provocado pela presença dos sedimentos finos (silte e argila) em suspensão que aumentaram significativamente a turbidez da “película” de água que cobre o raso de maré. A importância da análise da imagem de satélite de 2018-03-21 é abordada de forma mais detalhada em § III.2.2.1. A semelhança entre os resultados relativos à componente 3 ($ACP03$) e o índice NDVI foi reconhecida em estudos que desenvolveram a análise temporal do índice NDVI (Bellón et al, 2017) ou em trabalhos de investigação onde a ACP das bandas originais revelam a relação entre a componente 3 e o conteúdo em água (Estornell et al., 2013).

A aplicação dos limiares $NDVI_{\tau=0.2}$ e 0.3 e da ACP ao estuário do Rio Mira, seguindo a metodologia de Calleja et al. (2017), não permitiu identificar as áreas da zona intertidal cobertas por diferentes níveis de sapal (alto; médio e baixo sapal) e, em particular, nas áreas 1, 2 e 3 (Fig. 28). Esta dificuldade advém do facto destas classes apresentarem uma elevada similaridade espectral, tal como revelou a análise comparativa do padrão espectral de cada uma destas classes que é descrito no ANEXO IV.

A etapa 3 da metodologia de Calleja et al. (2017; etapa 3 da Fig. 18) não foi eficiente na definição das diferentes classes, já que o “*raster*” resultante do cálculo índices VARIGreen e EVI2 na zona intertidal são marcados pelo efeito “*salt and pepper*”, o que não foi possível de atenuar sem que se perdesse informação, mesmo após a aplicação de filtros na fase de pós-processamento.

III.2.1- Caracterização das classes de ocupação de referência

Tendo por base a informação obtida na análise do padrão espectral (ANEXO IV) e da aplicação dos limiares do índice NDVI (Fig. 28), ficou demonstrada a importância desta banda derivada na identificação das diferentes UMFS, e dos respectivos limites que permitem caracterizar a morfodinâmica da zona intertidal do estuário do Rio Mira.

A pertinência da aplicação deste índice de vegetação é particularmente evidente na zona a montante da ponte onde se notou que os limites das diferentes UMFS são mais complexos. Ao cálculo do índice NDVI acrescentou-se uma classificação não supervisionada (Fig. 19), o que possibilitou identificar as principais UMFS que caracterizam a zona intertidal do Rio Mira, e que também serviu para comparar imagens de satélite S2 em datas distintas.

Salienta-se que a montante da ponte do Rio Mira, as classes designadas por “Água” são as que contêm os píxeis que limitam a linha que define o nível mínimo da maré na máscara intertidal, que foi obtida por análise visual e digitalização usando o monitor do computador (Fig. 16). Por sua vez, a jusante da ponte esta metodologia revela-se sensível à separação entre zonas que podem conter “areia húmida” e zonas contíguas com “areia seca”. Aqui podemos incluir o caso das praias estuarinas que sofrem o efeito da variação diária da maré (regime semi-diurno), as zonas da praia submarina cobertas por uma coluna de água de baixa profundidade, e/ou a sua contiguidade com dunas na alta praia sempre emersas (este tópico será de novo abordada no § II.1.4.2).

A interpretação dos resultados da classificação obtida (Fig. 30) revela a necessidade de se ter optado por considerar dois conjuntos de classes (a jusante e a montante) para descrever a zona intertidal do estuário do Rio Mira. A jusante da ponte podemos incluir cinco 5 Classes (praia estuarina com “*areia molhada*”, praia estuarina com - “*areia seca*”, duna, margem de cascalho e raso de maré, sendo que as três primeiras não são reconhecidas a montante da ponte. Esta dicotomia na identificação das classes obtidas por uma classificação não supervisionada, não invalida a sua importância, pois constitui uma ferramenta “automática” importante que é complementar à análise visual, por exemplo se pretendermos a separação entre o alto sapal e o raso de maré com elevada cobertura de “ervas marinhas”. Para além disso, a transformação do “*raster*” da classificação em vectorial, permite ainda determinar as áreas cobertas por cada uma destas classes (Fig. 31).

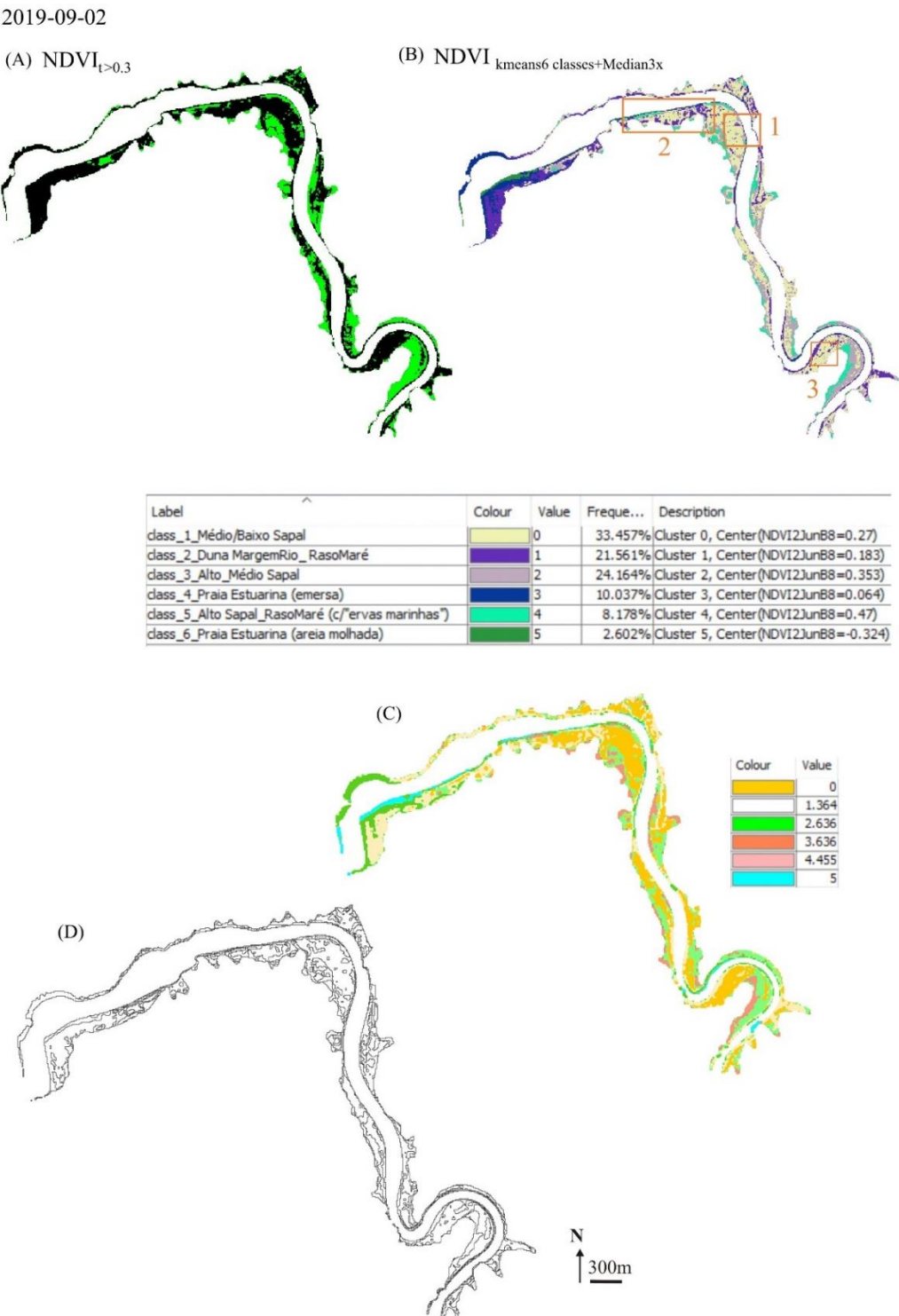


Figura 30- Imagem S2- 2019-09-02. (A)- Aplicação do limiar $NDVI_{t>0.3}$; (B)- Classificação não supervisionada do NDVI (“*KMeans*”; 6 classes); (C)- Aplicação do filtro (“*Median 3×3*”) à classificação NDVI+”*KMeans*”; 6 classes); (D)- Polígonos resultantes do processo de vectorização do “*raster*” da classificação.

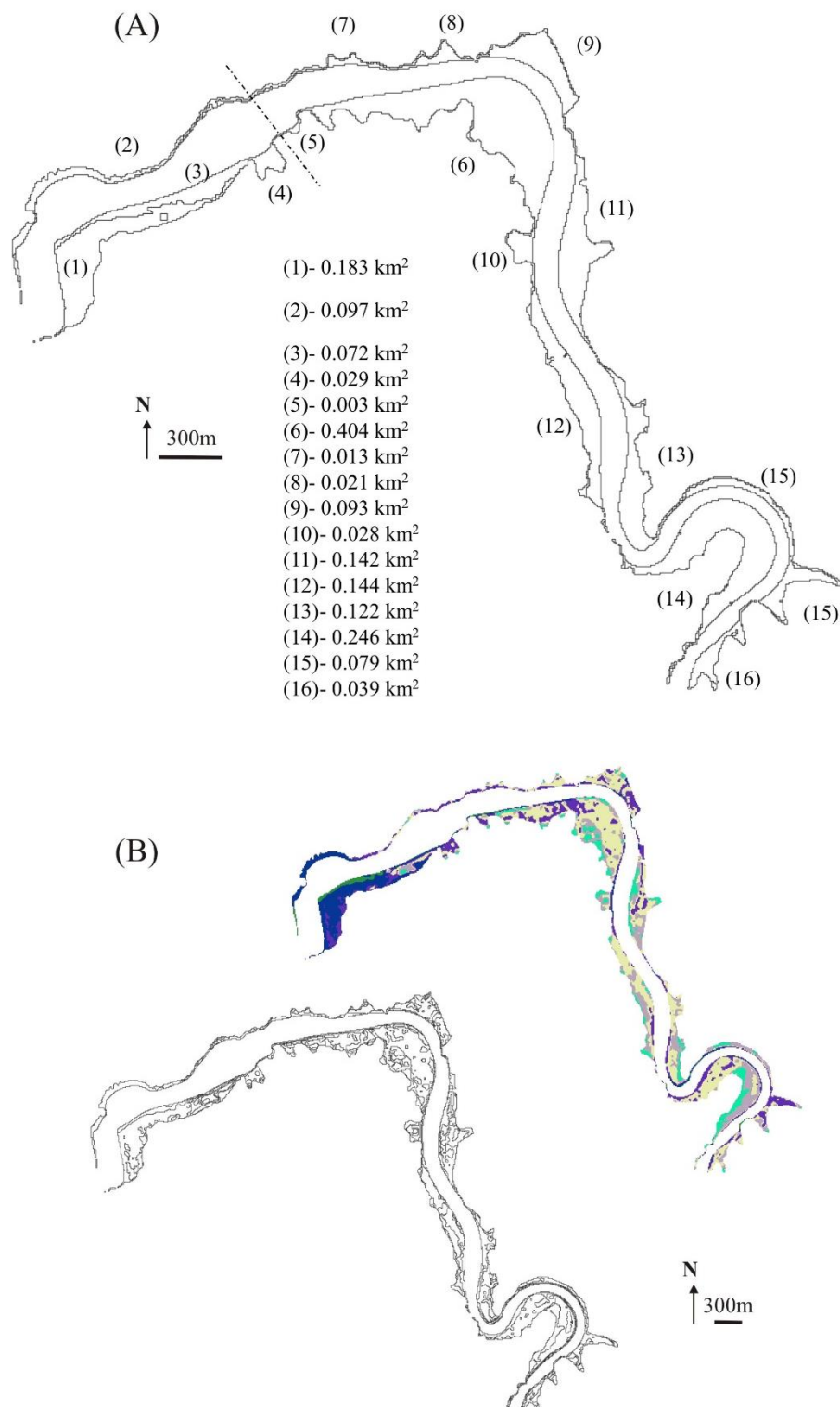


Figura 31- Mapas na zona intertidal: (A)- Segmentação simples da área intertidal e (B)- classes resultantes da transformação do “*raster*” da classificação não supervisionada (“*KMeans*”; 6 classes+*Median 3×3*”) do índice NDVI, em vectorial, para imagem S2-2019-09-02.

Face à qualidade dos resultados obtidos e à possibilidade de comparar resultados para imagens de satélite S2 com datas distintas, mas respeitantes ao mesmo estado fenológico, aplicou-se um filtro (“*Median 3×3*”) na fase de pós-processamento. O objectivo da aplicação deste filtro é o de melhorar a apresentação dos resultados finais, eliminando parte do efeito de “*salt and papper*” nas zonas intertidais, onde a cobertura vegetal é pouco contínua (“manchas” de *Spartina spp.*, presentes nas zonas 1, 2 e 3 da Fig. 30).

Na Figura 31 é possível identificar as diferentes classes de ocupação da zona intertidal, quer a jusante quer a montante da ponte. Esta informação permite melhorar de forma significativa o mapa inicial que subdivide a zona intertidal do Rio Mira em cerca de 16 zonas menores (Fig. 31), e que foi sendo aperfeiçoado com a introdução dos limites definidos pela aplicação dos limiares NDVI (Fig. 28). Verificou-se que a vectorização da classificação NDVI (“*K-Means*”) permitiu aumentar o detalhe do mapa da zona intertidal, incluindo as zonas com menor área. Contudo, não foi eliminada a dificuldade em distinguir as áreas de baixo e médio sapal, razão pela qual se optou por aplicar uma metodologia complementar descrita em III.2.3, para tentar ultrapassar esta contrariedade.

III.2.1.1- Avaliação da exactidão da classificação

A avaliação dos métodos de classificação foi efectuada sobre a classificação não supervisionada (“*NDVI-KMeans*” 6 classes) para toda a área intertidal compreendida entre a foz do Rio Mira e o lugar do Parral (≈9km a montante da foz; Fig. 32A). A aplicação desta metodologia implica que se considerem seis “*clusters*” que são definidos pela classificação não supervisionada (“*SNAP-NDVI-K Means, 6 classes*”), como sendo representativas das classes que caracterizam a totalidade da zona intertidal. Seguindo esta opção, verifica-se que um “*cluster*” pode corresponder a classes distintas, caso estejamos a considerar a área a montante ou a jusante da ponte sobre o Rio Mira (Fig. 32). Como exemplo, podemos referir que a classe 3 é classificada como “praia estuarina+duna” a jusante da ponte, enquanto a montante da ponte corresponde a “água”, uma vez que inclui zonas que coincidem com a fronteira entre a zona intertidal e o início do leito do rio (“linha de água/*waterline*”). A classe 5, à semelhança do que acontece com a classe 3, é

também classificada como “água” não estando praticamente representada a montante da ponte.

A caracterização espectral das principais classes presentes na zona intertidal (Anexo V) revelou uma semelhança espectral significativa entre classes contíguas. Para evitar o enviesamento na geração de pontos de validação, optou-se por gerar “*ground truth points*” de forma aleatória sobre a imagem classificada (Fig. 32B).

Estes pontos de validação que foram gerados aleatoriamente não “detectam” a classe “margem do rio” que descreve a margem setentrional do Rio Mira, a jusante da ponte, que é maioritariamente constituída por cascalho ou por rocha consolidada (metagrauvaques e quartzitos, Fig. 32B). Mesmo assim, podemos salientar que a classificação não supervisionada (Fig. 32A) consegue “detectar” a existência desta classe, e que após a vectorização do “*raster*” é eficaz na identificação de polígonos contínuos para a maior parte da margem setentrional do Rio Mira, entre a ponte e a Praia da Franquia, possibilitando avaliar qual a área intertidal que está coberta por esta classe.

Os pontos aleatórios de avaliação acima referidos foram projectados no “*Google Earth Pro*”®, sobre uma imagem de satélite adquirida em 2018-06-17, e que coincide com o período BM. A maior resolução espacial desta imagem do “*Google Earth Pro*”® ($\approx 2\text{m}$), conjuntamente com a informação obtida em campanhas de trabalho de campo em 2018-08-05, permitiu estabelecer uma classificação independente para cada um dos pontos aleatórios gerados ($N=300$ pontos). A Matriz de Confusão (ou de contingência) foi obtida no ArcGis (“*Compute Confusion Matrix*”) revelando uma boa exactidão na classificação da maior parte da zona intertidal do estuário do Rio Mira, com uma exactidão global (UA) igual a 84% e um “*Kappa*” de 81%. Com o objectivo de discriminar as classes de sapal e de raso de maré na zona intertidal a montante da ponte, e para as duas zonas de sapal imediatamente a jusante da ponte, na margem sul do rio (Fig. 31A; pontos (4) e (5); e Fig. 33A), procedeu-se à reclassificação da classificação inicial juntando as classes 3 e 5 numa única classe (3-Água; Fig. 33A). Esta associação justifica-se pelo facto destas duas classes serem úteis para delimitar a “linha de água” da BM de marés vivas que coincide com o leito do rio sem a influência da maré.

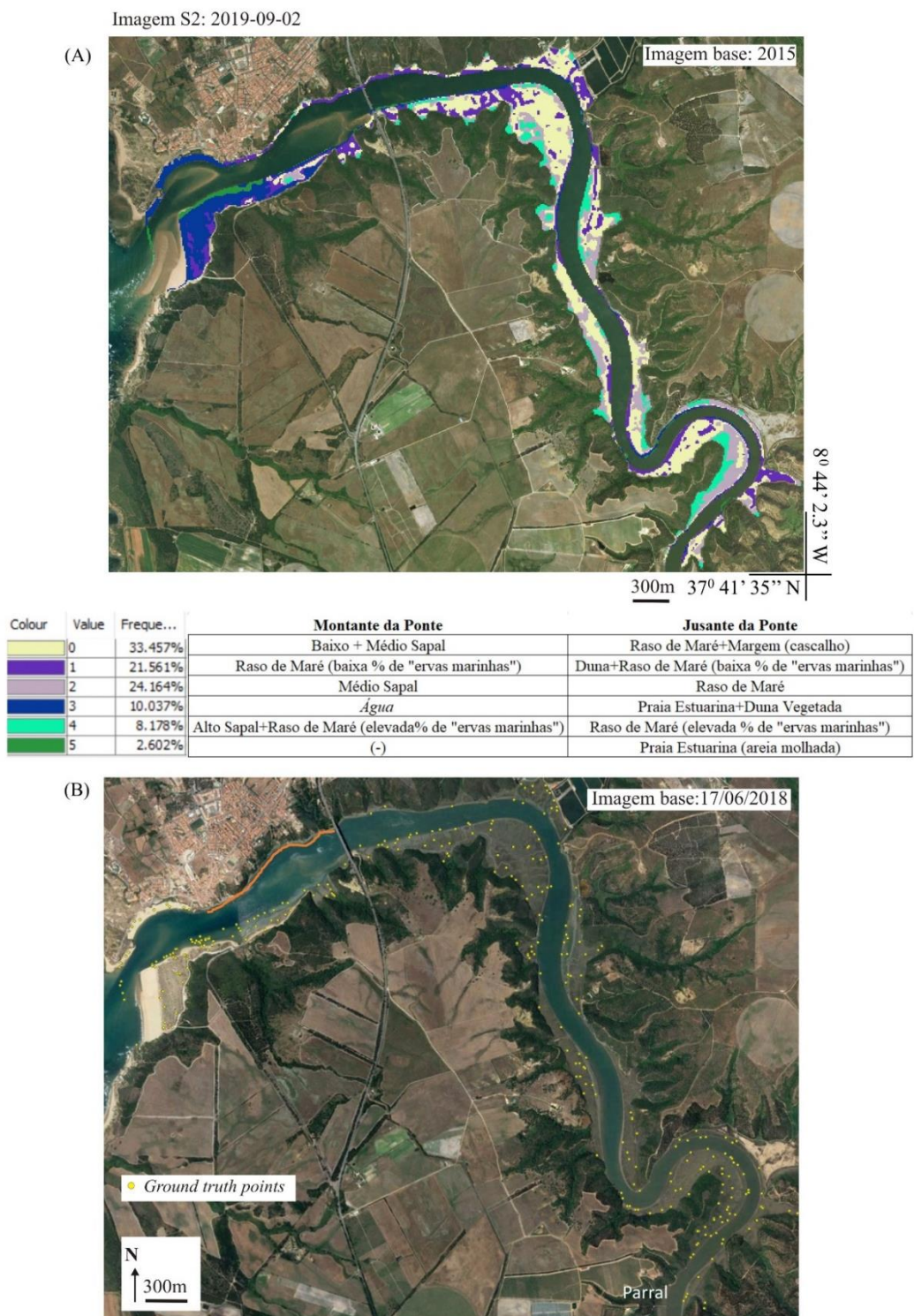


Figura 32- (A)- Identificação das seis classes resultantes da transformação do *raster* da “Classificação não supervisionada do índice NDVI” para a imagem S2 de 2019-09-02; (B)- representação dos 300 pontos aleatórios (“*ground truth points*”), gerados para validação da classificação não supervisionada sobre a imagem “*GoogleEarthPro®*”); Linha laranja (margem do rio; Mgrc-metagrauvaques; quartzitos).

Após esta reclassificação, realizou-se novamente a avaliação da exactidão da classificação, considerando apenas os pontos aleatórios inicialmente gerados e que se dispõem sobre a zona intertidal a montante da ponte (Figs. 33A e C; N=131). A precisão global da nova classificação para a área intertidal agora considerada e admitindo apenas 4 classes é de 75% para a exactidão global (UA) com um de “*Kappa*” de 68% (Fig. 33B).

Nesta análise comparativa da precisão global de classificação, foi sempre respeitada a aleatoriedade dos pontos gerados, sendo que alguns deles coincidem, no terreno, com zonas de fronteira entre duas classes distintas (e.g. raso de maré e baixo sapal) ou coincidem com o interior dos canais de maré. No caso da classe 4 (alto sapal+raso de maré com significativa cobertura de “ervas marinhas”), os pontos aleatórios que se dispõem na imagem de referência (“*Google Earth Pro*”®, 2018-06-17) na zona do raso de maré, foram classificados como pertencentes à classe 4 e não à classe 1 (raso de maré com baixa % de “ervas marinhas”), sempre que na imagem que nos serve de referência à classificação, é evidente a presença de uma significativa cobertura de “ervas marinhas” sobre o raso de maré. Seguimos este critério de separação porque a presença destas plantas sobre a superfície do raso de maré pode aumentar de forma muito significativa o valor do índice de vegetação NDVI (> 0.45), aproximando-se do valor que define a classe de alto sapal (Fig. 27).

No processo de avaliação da precisão global de classificação, poderia ter sido apenas considerada uma única classe de sapal, e desta forma, seria seguido o mesmo pressuposto de alguns estudos que usam dados de detecção remota para o mapeamento e classificação de áreas intertidais estuarinas. Se tivesse sido adoptada esta classificação mais simplista, os valores finais de precisão global da classificação (UA) e de *Kappa*”, teriam apresentado valores acima dos 90%. Contudo, e apesar do grau de incerteza que existe, em distinguir entre zonas de médio/baixo sapal e médio sapal, mesmo observando *in situ* durante as campanhas de trabalho de campo, decidiu-se separar estas duas classes na classificação não supervisionada. Esta decisão foi tomada porque se verificou que a classe de médio sapal, em zonas a montante do local designado por Dobadoura (Fig. 31A; ponto 10; ≈ 4.6 km a montante da foz), é possível de ser delimitada com algum grau de certeza. No entanto, nas áreas classificadas pela classe médio/baixo sapal ainda persistem dificuldades na definição dos seus limites, uma vez que coincidem com zonas de

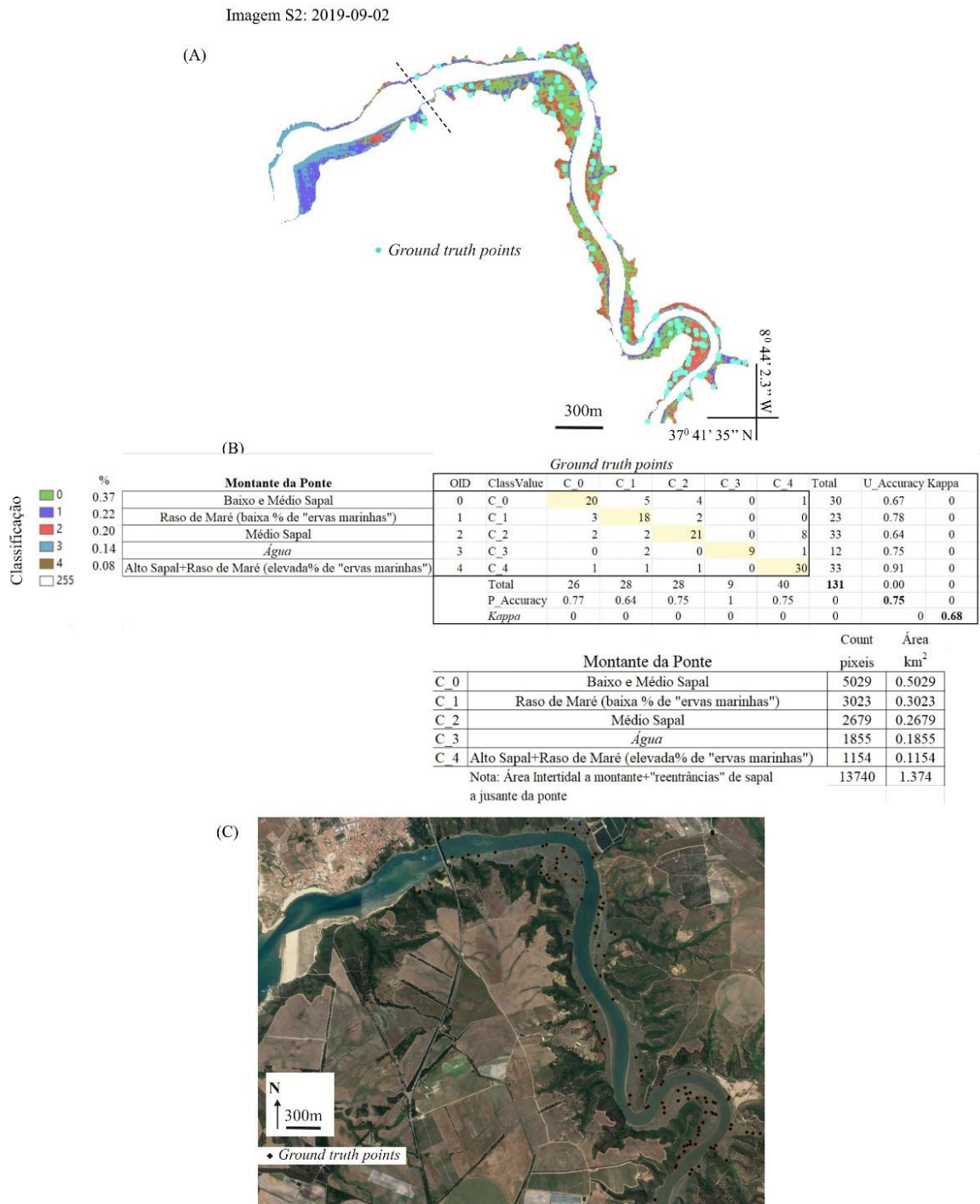


Figura 33-(A)- Resultado da reclassificação da classificação não supervisionada, “NDWI_Kmeans_6 Classes” (2019-09-02); (B)- Matriz de confusão obtida após classificação dos 131 de “ground truth points” aleatórios e (C)- representação dos 131 pontos aleatórios (“ground truth points”) gerados para validação da classificação não supervisionada sobre a imagem “GoogleEarthPro”®).

“manchas” de sapal dispersos, e que na sua maior parte estão cobertas por *Spartina spp.* ou por *Juncus spp.*. Assim sendo, as diferenças/similitudes das assinaturas espectrais destas duas classes de sapal, médio/baixo sapal e médio sapal, encontram-se descritas de forma gráfica no ANEXO IV através das suas curvas espectrais obtidas sobre pequenas áreas de cobertura.

III.2.2- Análise interanual das classes de ocupação (2015-2018-2019)

A classificação não supervisionada “*K-Means*” (Fig. 30) da imagem de satélite de 2019-09-02, que serve de base ao presente trabalho, foi replicada para a imagem de 2015 (Fig. 34) com o objectivo de caracterizar o padrão de evolução de curto prazo da zona intertidal do estuário do Rio Mira.

A análise comparativa do padrão evolutivo das principais classes revelou obstáculos na determinação do padrão evolutivo nas zonas 1, 2 e 3 que estão assinaladas na Figura 34B. A comparação directa e pouco crítica da classificação não supervisionada para as duas datas permitiu constatar que: i) na área 1, genericamente designada por médio/baixo sapal, corresponderia a alto sapal (“manchas” mais verdes/azuis na classificação da imagem de satélite de 2015 com cerca de 0.013km²); ao comparar as imagens de 2015 e de 2019, em 2019 (Fig. 30B, área 1) deixa de se observar esta área de alto sapal; e ii) na área 2 (Figs. 30 e 34B), pelo contrário, entre a imagem de satélite de 2015 e a de 2019, nota-se um aumento muito significativo da área de baixo sapal; observando-se a mesma tendência na área 3 (Figs. 30 e 34B). Este padrão evolutivo apresentado por estas duas áreas intertidais próximas, traduz-se por um aumento “artificial” e aparente das áreas de sapal, pois a formação de novas áreas de sapal é um fenómeno natural cuja escala temporal é superior a 4 anos. Sabendo que a extensão da área coberta por “ervas marinhas” num estuário pode apresentar variações cíclicas (Calleja et al., 2017; Barillé et al., 2010; FAST, 2017), e que este fenómeno natural está também descrito no estuário do Rio Mira (Adão, 2004), poderá ser insuficiente desenvolver uma análise interanual que esteja baseada exclusivamente na utilização de um índice de vegetação NDVI, menosprezando a informação complementar de

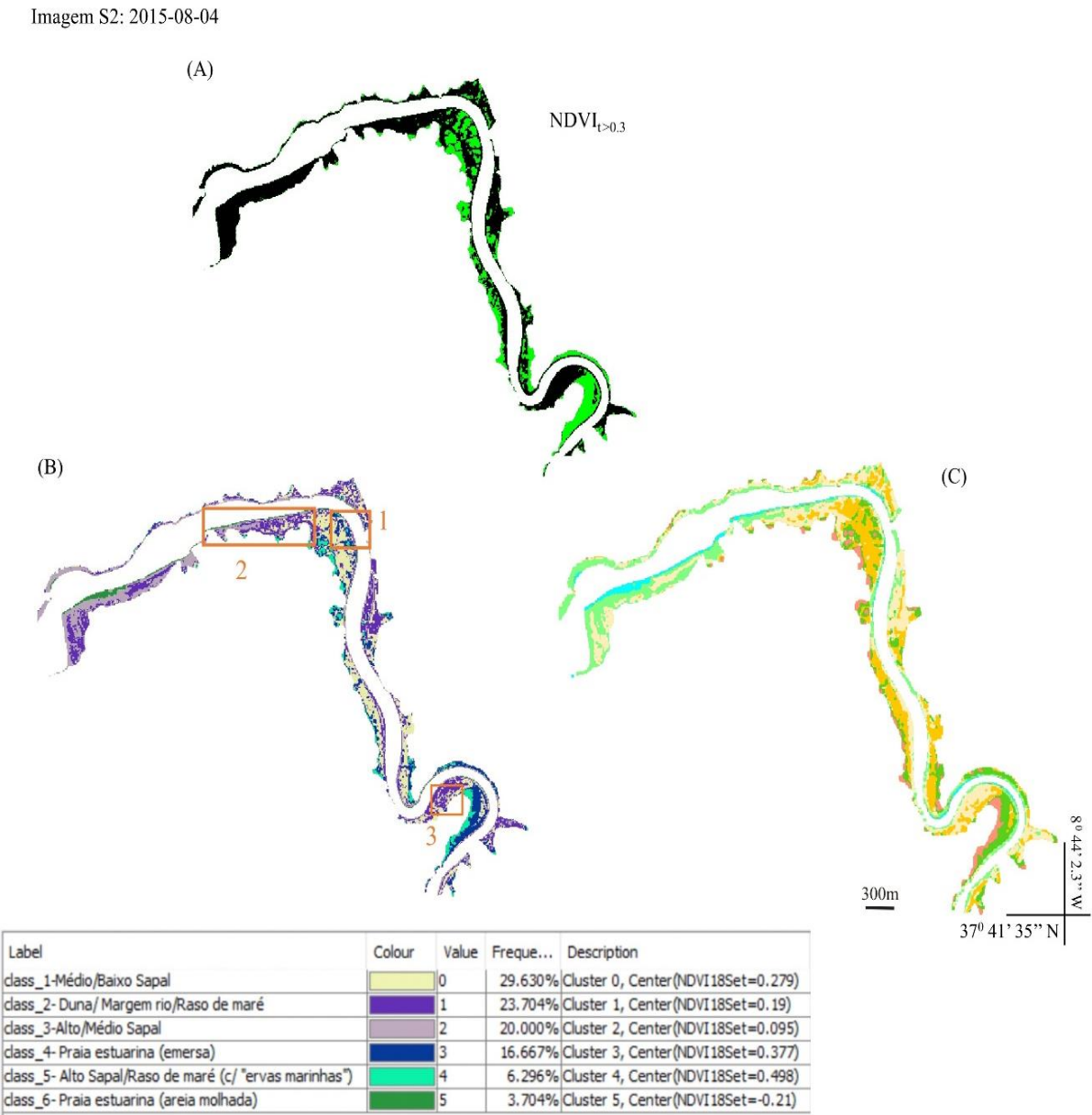


Figura 34- Imagem S2 de 2015-08-04. (A)- Aplicação do limiar NDVI_{t>0.3}); (B)- Classificação não supervisionada (NDVI; “K-Means; 6 classes”); (C)- Filtro (“Median 3×3”) aplicado à classificação NDVI (B).

observações realizadas durante campanhas de trabalho de campo. De facto, a presença de “ervas marinhas” (e.g. *Zostera spp.* e de algas) na superfície do sedimento silto-argiloso que constituiu o raso de maré pode contribuir para aumentar o valor do índice NDVI. Este resultado pode implicar que esta área de raso de maré possa ser erroneamente somada à área das classes de médio sapal ou de alto sapal. Tendo em consideração esta limitação do método, e de modo a ultrapassar este obstáculo seleccionou-se para processamento a imagem de satélite de 2018-03-21 (§ III.2.2.1). Esta imagem de satélite foi escolhida porque registou o momento em que a coluna de água que cobre grande parte da zona intertidal, e em particular, a zona do raso de maré em período BM, apresenta elevada quantidade de sedimentos finos (siltes e argilas) em suspensão.

III.2.2.1- Proposta de um “proxy” para a delimitação do raso de maré

A observação da imagem de satélite de 2018-03-21 do estuário do Rio Mira revela uma grande quantidade de sedimentos em suspensão na coluna de água, que por esse motivo apresenta uma tonalidade acastanhada que se estende em direcção ao mar formando uma pluma turbida (Fig. 10). Este fenómeno de transporte de sedimentos em suspensão resulta da elevada pluviosidade registada durante o mês de Março de 2018 (Fig. 10B). A coluna de água do Rio Mira que apresentou elevada concentração de sedimentos em suspensão inundou a quase totalidade da zona intertidal durante a preia-mar (PM) (Fig. 10B). Durante a BM, os canais de maré e o raso de maré, que apresenta um declive muito suave, ficou coberto por uma coluna de água reduzida mas também com sedimentos finos em suspensão (Fig. 10A). De facto, é usual que a água superficial tenha tendência para permanecer por algum tempo a cobrir áreas, onde predominam sedimentos finos como o silte e a argila (e.g. Ryu et al., 2002), como é exemplo o raso de maré. Dadas estas características particulares da distribuição da água e de sedimentos no raso de maré, a sua reflectância espectral é muito discutida, na sua maioria recorrendo a imagens Landsat, procurando-se desenvolver a melhor forma de conseguir a delimitação automática da “waterline” (linha de água) entre o raso de maré e a classe “água” que muitas vezes também apresenta elevada concentração de sedimentos em suspensão (e.g. Ryu et al., 2002), e também de caracterizar a distribuição superficial de sedimentos (i.e.

fácies sedimentares superficiais) no raso de maré (e.g. Ryu et al., 2004; Choi et al., 2010; imagens UAV (“*Unmanned Aerial Vehicle*” Kye- Lim Kim et al., 2019). Porém, a abordagem a este tópico pode ser ainda mais complexa se admitirmos que a reflectância no raso de maré pode ser afectada por vários outros parâmetros como a dimensão das partículas sedimentares, o conteúdo em humidade, o declive do local, a turbidez da água do mar e a existência de canais de maré (Ryu et al., 2002). Convém ainda ter presente que os sedimentos finos que podem existir em suspensão na coluna água que cobre o raso de maré podem manter durante algum tempo a “água turva” podendo afectar a banda NIR (Ryu et al., 2002). Perante a possível existência deste constrangimento optou-se por utilizar a equação 3 de Silio-Calzada et al. (2017) para a estimar o índice NWI, onde são consideradas as bandas B2, B3 e B4 do visível, assim como outras bandas, como as B5, B6 e B8 que compõem o “Red Edge”, e ainda a banda B9, e as bandas B11 e B12 (SWIR). Neste contexto é possível considerar que a coluna de água “turva” que cobre as áreas de menor declive do raso de maré, é usada como um “filtro” para os valores de reflectância gerados pela cobertura de “ervas marinhas” que, em condições “normais”, e em determinados locais, cobrem a quase totalidade do raso de maré fazendo com que o valor máximo do índice NDVI se aproxime de 0.5 (Fig. 27). Deste modo, o índice NWI permite obter uma imagem de referência para toda a zona intertidal, compensando as limitações do índice NDVI quando aplicado em zonas com elevado grau de exposição de solo (Mahdianpari et al., 2018), i.e. zonas com pouca vegetação, equivalentes ao raso de maré quando está maioritariamente coberto por sedimentos finos. Para além disso, as zonas de baixo sapal e/ou com “manchas” de vegetação que geralmente estão cobertas por *Spartina spp.*, que é uma planta que não sendo “rasteira” deixa zonas da superfície a descoberto intercaladas com zonas com folhas (Fig. 12D), podem dificultar a aplicação com sucesso do índice NDVI. Esta situação verifica-se nas zonas 1, 2 e 3 do estuário do Rio Mira (Fig. 34B) onde o sapal é caracterizado por “manchas” descontínuas, com diferentes níveis altimétricos de sapal e que são atravessadas por canais de maré com diferentes características em termos de largura, de profundidade e de cobertura por “ervas marinhas”.

Outro aspecto importante que deve ser salientado é que a imagem de satélite seleccionada é de Março (2018-03-21). No início da Primavera, a vegetação da zona intertidal não apresenta o mesmo estado “fenológico” das imagens de 2015 e de 2019 que

foram adquiridas no Verão. Assim, o estudo comparativo da informação obtida por estas imagens não é aconselhável usando simplesmente o índice NDVI (2015 e 2019), mas apenas se for introduzida informação complementar obtida, por exemplo, através do cálculo do índice NWI. O resultado da classificação não supervisionada do índice NWI (“*K-Means*”; 6 classes) seguido da transformação “*raster*” para vectorial (idêntico ao procedimento da Fig. 19) revela a existência de “manchas” de baixo sapal nas zonas 2 (Fig. 35). O facto destas “manchas” não serem “identificadas” pelo índice de vegetação NDVI na imagem de satélite de 2015 (Fig. 34) sugere que a imagem de satélite Sentinel-2 de 2015 pode ilustrar um ano ou mês que registou baixa actividade fotossintética no baixo sapal/raso de maré do estuário do Rio Mira. Esta variabilidade nos valores dos índices de vegetação deve ser tida em conta em trabalhos futuros, caso contrário pode ser cometido o erro de se descrever padrões de evolução do baixo sapal que não correspondem à realidade.

Por outro lado, verifica-se que o resultado da classificação usando o índice NWI na zona a montante da ponte permitiu: i) estimar a extensão da área coberta pelo raso de maré, diminuindo de forma significativa o efeito causado pela cobertura do sedimento por “ervas marinhas” traduzido por um valor do NDVI elevado; ii) identificar os canais de maré mais largos (zona 2 e área adjacente ao Moinho da Asneira); e iii) distinguir níveis de médio e de alto sapal (e.g. zona 3).

Já a jusante da ponte sobre o Rio Mira esta classificação permitiu, à semelhança da classificação baseada no índice NDVI, definir os limites das praias estuarinas (praia emersa e imersa, *grosso modo*, areia húmida e areia seca), o campo dunar adjacente à Praia das Furnas, a margem rochosa do rio (margem norte do rio a jusante da ponte), e ainda, entre o raso de maré que está coberto por areia e o que está predominantemente coberto por sedimentos finos (silte+argila). Na Tabela 3 são apresentadas as áreas “rectificadas” relativamente às inicialmente estimadas pelo índice NDVI, podendo-se considerar esta aproximação como um mapa base para futuras análises interanuais usando dados de Detecção Remota Sentinel-2.

Imagem S2: 2018-03-21

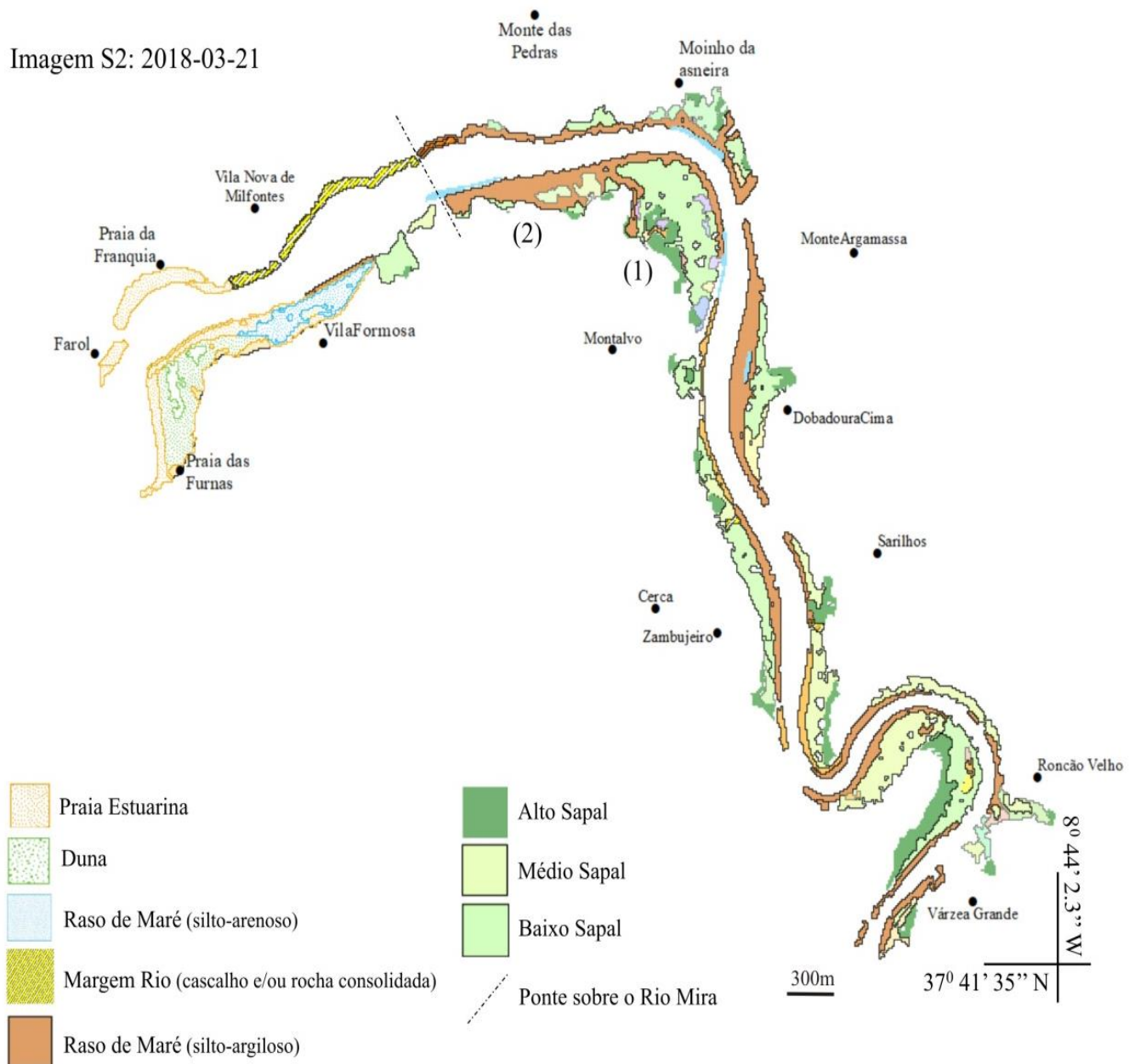


Figura 35-Imagem S2 de 2018-03-21. Classificação não supervisionada sobre o índice NWI (“K-Means”; 6 classes).

Margem Norte	Sector	Classes	Pixeis	Área (km ²)
<u>Praia da Franquia-Ponte</u>				
		Praia Estuarina	604	0.060
		Margem do rio (cascalho)	521	0.052
<u>Ponte-Moinho Asneira</u>				
		Sapal	538	0.054
		Raso de Maré	729	0.073
		Margem do rio (cascalho)	59	0.006
<u>Monte Argamassa-Dobadoura de Cima</u>				
		Sapal	661	0.066
		Raso de Maré	762	0.076
<u>Sarilhos-Roncão Velho</u>				
		Sapal	1706	0.171
		Raso de Maré	745	0.075
<u>Várzea Grande</u>				
		Sapal	250	0.025
		Raso de Maré	194	0.019
<u>Margem Sul</u>				
<u>Praia das Furnas-Ponte</u>				
		Praia das Furnas	313	0.031
		Duna	1569	0.157
		Praia Estuarina	1154	0.115
		Sapal	285	0.029
		Raso de Maré	86	0.009
<u>Ponte-Montalvo</u>				
		Sapal	2650	0.265
		Raso de Maré	1392	0.139
<u>Montalvo</u>				
		Sapal	232	0.023
		Raso de Maré	26	0.003
<u>Cerca-Zambujeiro</u>				
		Sapal	919	0.092
		Raso de Maré	491	0.049
<u>Cortes de Cima (Meandro)</u>				
		Sapal	1982	0.198
		Raso de Maré	478	0.048

Tabela 3- Distribuição das principais classes identificadas na área intertidal, tendo por base a classificação não supervisionada sobre o índice NWI (“*K-Means*”; 6 classes) da Imagem S2- 2018-03-21 (Fig.35).

A importância das bandas NIR (B8) e SWIR (B11 e B12) na compreensão da assinatura espectral da zona de raso de maré é apresentada na Figura 36, tendo sido considerada a área mais extensa e contínua de raso de maré que foi possível de identificar por este método (polígono 465; 0.131 km²). Usando este polígono (465) foi ainda realizada uma análise comparativa (Fig. 36) da distribuição da reflectância para as três imagens de satélite S2 de 2015, 2019 e 2018. A análise revelou que a imagem de satélite S2 de 2018-03-21 apresenta: i) uma curva ascendente na “região” do visível; e ii) valores de reflectância nas bandas B8 (NIR) e B11 (SWIR) de maior valor, quando comparado com os valores das imagens S2 de 2019-09-02 e 2015-08-04. Este padrão agora reconhecido reforça a importância das bandas NIR e SWIR, mas também das bandas do VIS, na identificação do raso de maré. A aplicação da banda derivada NWI poderá justificar os bons resultados obtidos na identificação das áreas de raso de maré, na imagem de satélite de 2018-03-21.

Em síntese, podemos afirmar que é vantajoso usar a fórmula de Silio-Calzada et al. (2017) no cálculo do índice normalizado de água, NWI (“*Normalized Water Index*”; § III.1.1; eq.3) porque as bandas NIR (B8) e SWIR (B11 e B12) são cruciais para melhor interpretar a assinatura espectral da classe raso de maré.

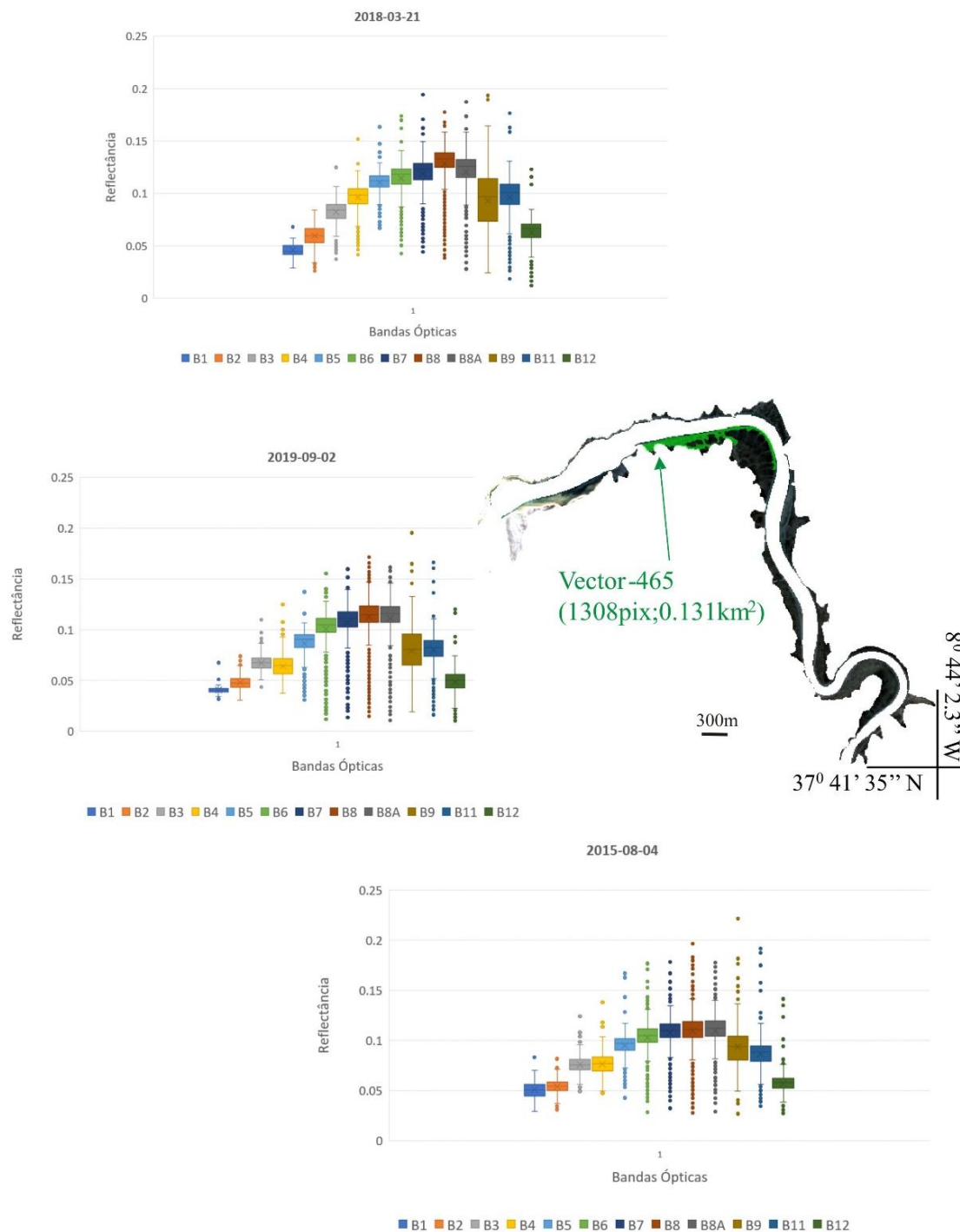


Figura 36- Gráfico Box-Plot da reflectâncias da imagem S2 de 2018-03-21, considerando a área mais extensa que descreve a classe de raso de maré (polígono 465).

III.2.3- Padrão de submersão da zona intertidal em função da amplitude do ciclo de maré

A resolução temporal dos dados de Detecção Remota Sentinel-2 e a sua disponibilização gratuita em plataformas como o “*Sentinel Playground*”(<https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground>), que as permite visualizar de forma rápida, representam uma excelente fonte de informação geográfica que foi considerada nesta dissertação de Mestrado. A plataforma “*Sentinel Playground*” foi usada para seleccionar imagens de satélite que coincidissem com o pico de PM e com períodos onde tivesse sido registada a amplitude máxima da maré (PM de “Marés Vivas”; 2020-06-03; 3.3m; 12:29 UTC) e a amplitude mínima da maré (PM de “Marés Mortas”; 2019-09-07; 2.7m; 10:30 UTC), registadas no estuário do Rio Mira. Esta escolha selectiva teve como objectivo reproduzir as variações do ciclo de maré mensal. Na descrição da amplitude do ciclo da maré mensal, foram considerados os dados da maré prevista para o Porto de Sines (dados disponíveis no site do Instituto Hidrográfico; <https://www.hidrografico.pt/prev.mare>), cuja curva inclui períodos com amplitude máxima da maré (PM de “Marés Vivas”-3.5 m) e períodos de amplitude mínima da maré (PM de “Marés Mortas”-2.7 m, Fig. 37).

Ao serem considerados os valores de amplitude máxima de maré, tornou-se possível identificar as zonas de sapal que ficaram sempre submersas durante os períodos de PM (independentemente da amplitude da maré) e as que ficaram imersas somente durante períodos de PM de “Marés Vivas”. Verificou-se ainda que algumas zonas, localizadas no limite superior da zona intertidal (alto sapal), apenas ficaram imersas quando ocorreram cheias no Rio Mira que foram coincidentes com o pico de PM.

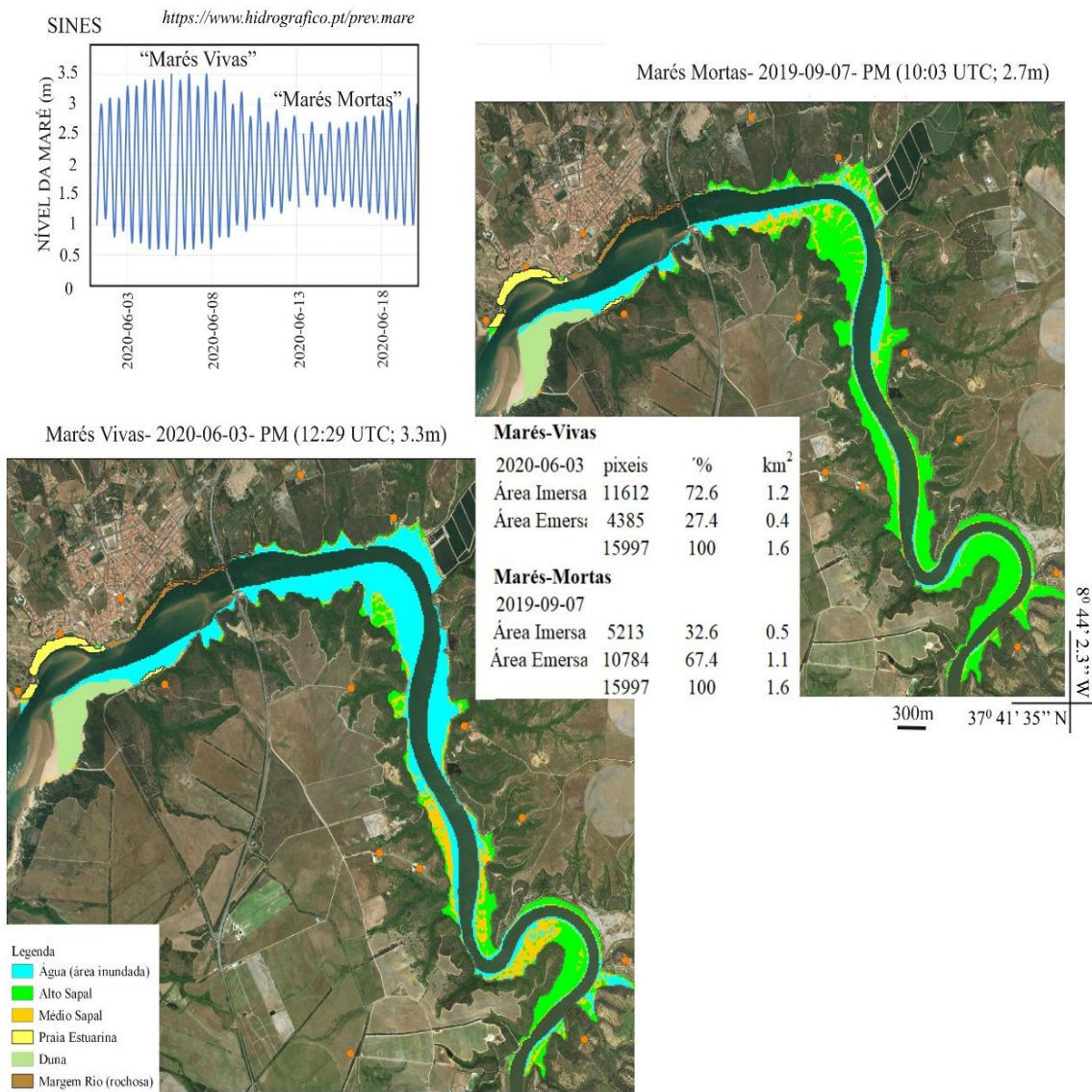


Figura 37- Padrão de inundação da área intertidal entre a foz e o Parral, tendo por base o cálculo do índice NDWI: (A)- PM de “Marés Vivas; 2020-06-03: 12:29; 3.3m; e (B)- 2019-09-07: 10:03; 2.7m Preia-mar (“Marés Mortas”). Estimativa das áreas imersa e emersa.

No procedimento seguido na caracterização do padrão de inundação das zonas de sapal, em função da amplitude do ciclo de maré, foi usado o índice NDWI (“*Normalized*

Difference Water Index”) e a equação 2. Desta forma, tal como foi referido em II.1.1, ao mesmo tempo que se maximiza a reflectância típica das “*water features*” usando a banda

verde (B3), tira-se vantagem da elevada reflectância da banda NIR pelo tipo de vegetação terrestre e pelas características do solo. A utilização do índice NDWI demonstrou ser vantajosa para distinguir a classe água e as classes sapal (vegetação) e raso de maré (sedimento). Esta abordagem contribuiu para minimizar o impacto negativo da inexistência de informação sobre a batimetria e de um MDT da zona intertidal. O índice NDWI funcionou como “*proxy*” para a altimetria do sapal e para distinguir as classes de alto, de médio e de baixo sapal, e ainda, para complementar a informação obtida nas campanhas de trabalho de campo.

Para cada uma das imagens de satélite seleccionadas de 2020-06-03 e de 2019-09-07 foi calculado o índice NDWI, seguindo-se a aplicação de uma classificação não supervisionada “*K-Means*” (Fig. 37 e Anexo VI). A transformação do “*raster*” em vectorial destas duas imagens permitiu estimar as áreas imersas *versus* áreas emersas para cada uma das datas referentes ao período de PM de “Marés Vivas” e de “Marés Mortas”, Fig. 37). A Tabela da Figura 37 apresenta uma listagem dos valores da área “inundada” em cada uma das situações, tendo sido excluídas desta análise as zonas mais extensas que se encontram sempre emersas, correspondentes ao campo dunar contíguo à Praia das Furnas e ao sector da alta praia da Praia da Franquia. Os resultados obtidos revelam que a área intertidal potencialmente inundável pode atingir uma extensão de 1.6 km², sendo possível estimar que quando ocorrem “Marés Vivas” a área imersa é de aproximadamente 1.16 km², enquanto para “Marés Mortas” este valor diminui para praticamente metade com 0.52 km².

No passo seguinte da metodologia aplicada, as duas imagens de satélite classificadas de 2020-06-03 e de 2019-09-07, foram usadas para determinar a “*Land Cover Change-LCC*” entre “Marés Vivas” e “Marés Mortas” usando o processamento automático do QGIS-SCP (“*Land Cover Change*”). Seguiu-se a transformação “*raster*” em vectorial da imagem LCC final, e o cálculo de cada um dos polígonos obtidos pelo processo de vectorização. Os resultados finais são apresentados na Figura 38 sobre uma imagem do “*Google Earth Pro*”.

LCC: 2020-06-03 vs 2019-09-07

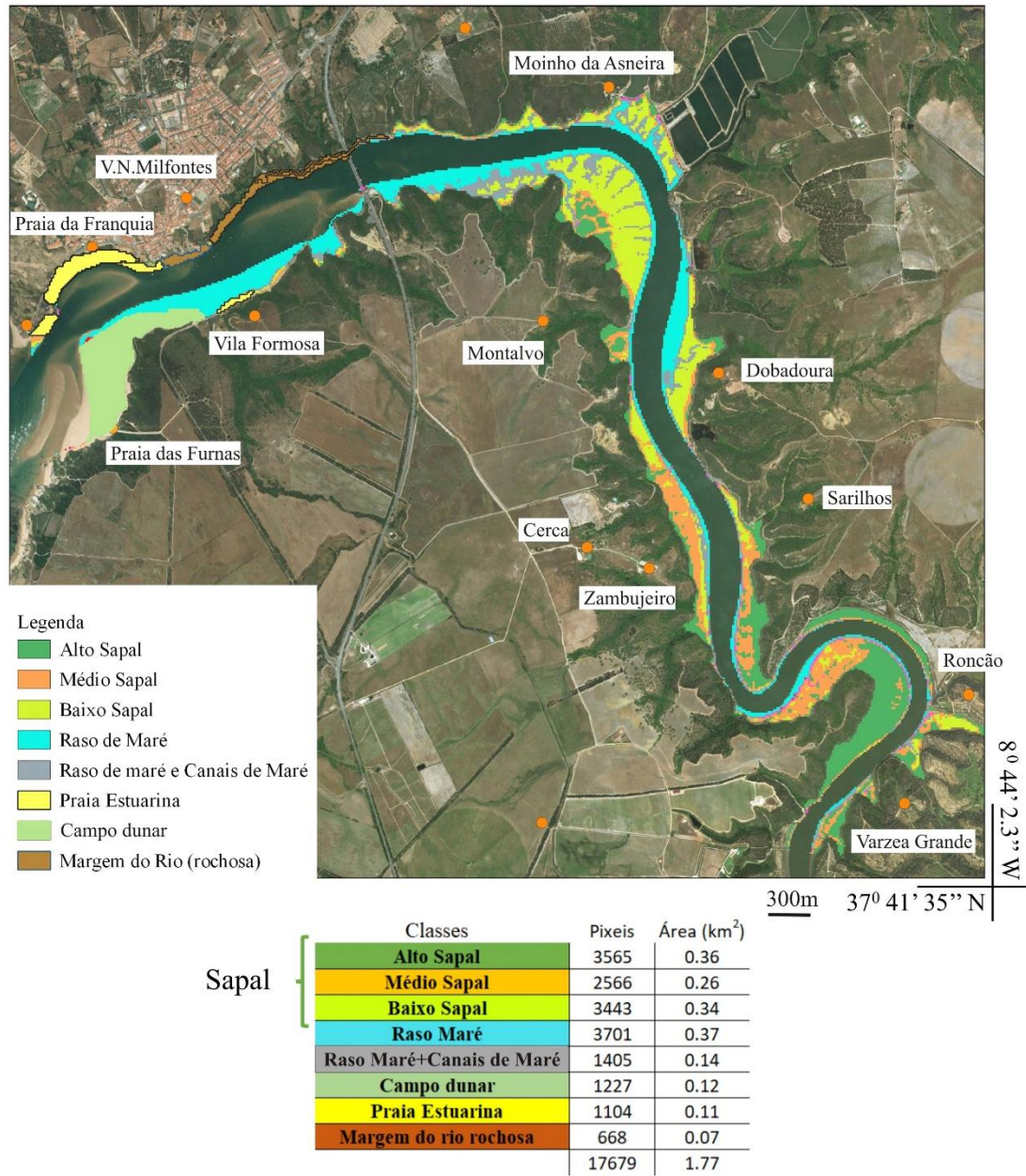


Figura 38- Resultado da “*Land Cover Change-LCC*” entre as áreas inundadas em período de PM de “Marés Vivas” (2020-06-03; 12:29 UTC; 3.3m) e de “Marés Mortas” (2019-09-07; 10:30 UTC; 2.7m). Tabela- Estimativa da área das classes mais representativas da área intertidal estudada.

Tendo em consideração, a informação prévia resultante dos procedimentos de classificação acima descritos (Fig. 38), conjugada com os dados que foram sendo obtidos nas campanhas de trabalho de campo, foi possível distinguir as oito classes: alto, médio e baixo sapal; raso de maré; raso de maré e canais de maré; campo dunar; praia estuarina e margem do rio (consultar tabela da Fig. 38). A importância destes resultados reside no facto de ser possível construir um mapa temático da zona intertidal do estuário do Rio Mira onde são apresentadas as áreas cobertas pelas três classes de sapal (alto, médio e baixo sapal). A “componente” altimétrica introduzida para a classificação das diferentes unidades de sapal, usa como “*proxy*” a aplicação dos índices NDWI (Anexos III e VI e NWI, este último reproduzido na imagem de 2018-03-21 (Fig. 35). Para a classe de alto sapal estimou-se uma área com cerca de 0.35 km², onde grande parte se localiza na parte superior do meandro da zona do Corgo da Ponte Quebrada, a 8.3 km para montante da foz do Rio Mira. A restante área da classe de alto sapal, abrange praticamente a totalidade do limite superior da zona intertidal a montante da ponte sobre o Rio Mira (e.g. zona 1-Montalvo, e na zona de Sarilhos). Por sua vez, a classe de médio sapal que apresenta uma área de cerca de 0.26 km², sendo contígua às zonas ocupadas pelo alto sapal, alcança a sua maior extensão na zona da Ponte Quebrada, no sector descendente do meandro, distribuindo-se também pelas zonas de Sarilhos e de Cerca-Zambujeiro. Por último, a classe de baixo sapal com uma área de aproximadamente 0.34 km² cobre as zonas que estão localizadas principalmente a jusante da Cerca, tendo sido possível aumentar a discriminação da sua distribuição nas zonas 1 e 2, assim como da zona adjacente ao Moinho da Asneira/antigas pisciculturas (Fig. 38). Na zona 3 (Corgo da Ponte Quebrada) a presença da classe baixo sapal, está limitada a zonas contíguas aos principais canais de maré.

Na abordagem que descreve “*Land Cover Change-LCC*” entre “Marés Vivas” e “Marés Mortas”, a classe de raso de maré apresenta um padrão de distribuição semelhante ao obtido com a determinação do índice NWI sobre a imagem Sentinel-2 de 2018-03-21 (Fig. 35) com o benefício de ser eficaz na “detecção” da presença dos principais canais de maré. Face a estes resultados, considera-se que este procedimento poderá ser usado como complemento ao anteriormente descrito e baseado no índice NWI (Fig. 35) ou até substituí-lo, caso não exista uma imagem de satélite que possibilite caracterizar, outras zonas intertidais estuarinas, após um período de forte precipitação.

Os resultados obtidos sobre as três classes de sapal, podem vir a ser comprovados recorrendo a informação complementar resultante das campanhas de trabalho de campo e das imagens de satélite que estão disponíveis no “*Google Earth Pro*”. Contudo, os dados apresentados no mapa da Figura 38 deverão ser alvo de posterior validação através de observações no campo em colaboração com um investigador especialista em plantas halófitas. De facto, verifica-se que é grande o grau de dificuldade que um leigo terá em identificar os biótopos presentes nestas áreas intertidais, e em fazer a correspondência entre os biótopos das comunidades vegetais e os diferentes níveis altimétricos do sapal. Mesmo em áreas intertidais de pequena extensão, como é o caso da parte terminal do estuário do Rio Mira, onde a área ocupada pela zona intertidal tem cerca de 1.77 km² (Fig. 16). A complexidade desta tarefa pode ser ilustrada através da análise comparativa dos resultados das classificações não supervisionadas “*K-Means*” (NDVI e NWI) (Fig. 39B e Fig. 35) e a determinação da “*Land Cover Change*”, considerando o índice NDWI (Fig. 38), que foram obtidos para uma pequena zona intertidal com cerca de 0.026 km² que ocupa uma reentrância da margem meridional do estuário do Rio Mira (Fig. 38, Montalvo e Fig. 39). As classificações obtidas indicam que existe um padrão de distribuição de classes muito idêntico: uma zona central de alto sapal com uma área de 0.0027 km² e cotas estimadas em 1.44 m (Câmara Municipal de Odemira: <https://www.cm-odemira.pt>), que não é inundada na PM de “Marés Vivas” e está limitada por canais de maré. Esta zona central de alto sapal surge rodeada por médio sapal. A zona de médio sapal que apenas é imersa durante os períodos de “Marés Vivas”, ocupa uma área de aproximadamente 0.011 km² a cotas estimadas de 2.46 m (<https://www.cm-odemira.pt>); Fig. 39).

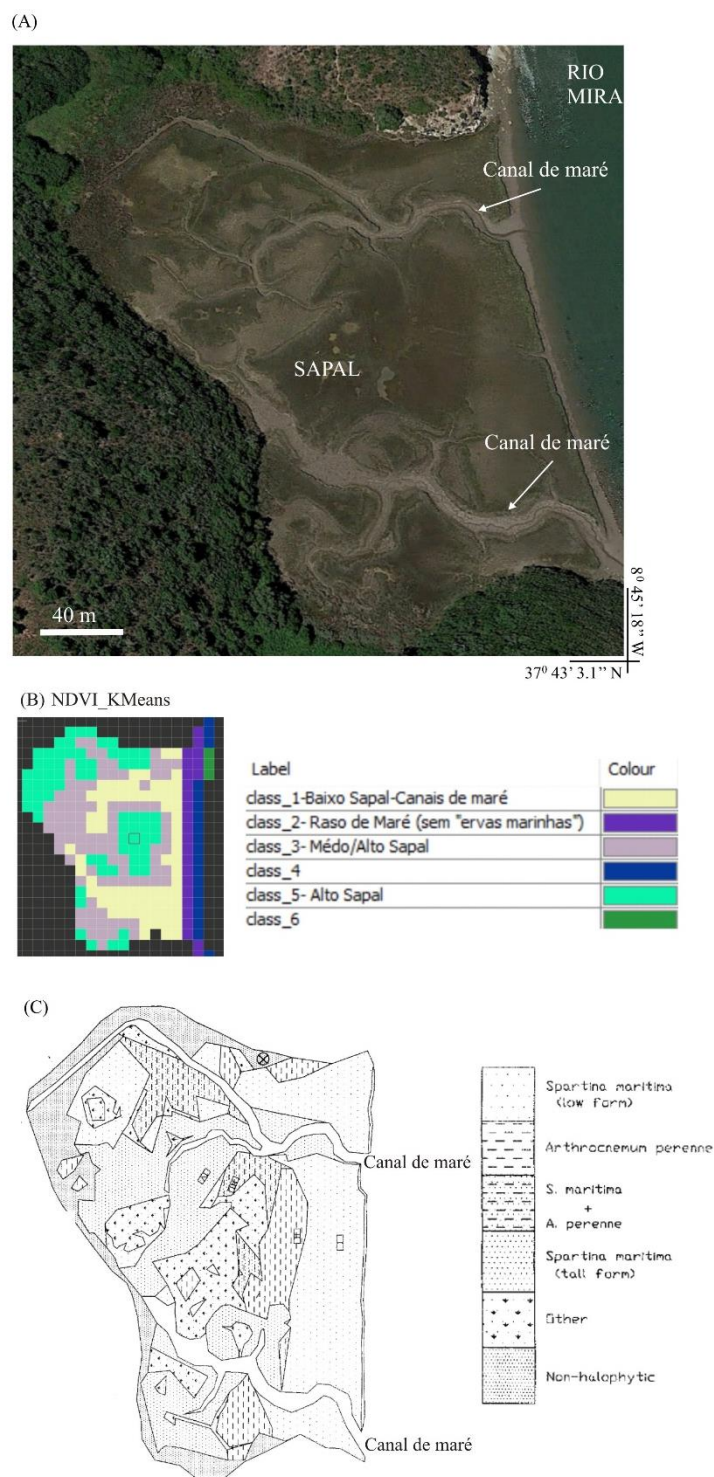


Figura 39- Pormenor de uma área de sapal (área $\approx 0.026 \text{ km}^2$) junto ao Montalvo (4.6 km a montante da foz). (A)- Imagem do Google Earth Pro; (B)- Classificação não supervisionada (NDVI; “*K-Means*”; 3 classes) e (C)- Cobertura da vegetação halófito de acordo com Catarino e Serôdio (1992; *in* Costa et al., 2001).

Através da análise comparativa dos resultados da classificação LCC e da identificação da cobertura vegetal desta reentrância do sapal no estuário do Rio Mira apresentados por Catarino e Serôdio (1992; *in* Costa et al., 2001), foi possível considerar que a parte central de alto sapal com cerca de 0.0027 km² inclui maioritariamente três tipos de plantas: *Anthrocnemum perenne*, *Spartina maritima* (*tal form*) e “other”. No entanto, o médio sapal está apenas coberto por *Spartina maritima* e *Anthrocnemum perenne*. Por sua vez, a transição com a zona estreita de raso de maré não vegetado apresenta-se coberta por *Spartina maritima* (“*low form*”), e os canais de maré são rodeados por *Spartina maritima* (“*tal form*”) nas áreas mais internas da pequena reentrância. A coexistência de mais do que uma espécie de plantas, mesmo nas zonas com altimetria mais elevada, levou os autores a recorrer à classe “other” (Fig. 39 C) para classificar a vegetação existente, revelando a complexidade desta tarefa. A presença da *Spartina maritima* (“*low form*”) marca as zonas de baixo sapal que sofrem o efeito das oscilações da maré diária.

Resumindo, os resultados obtidos para o sapal do estuário do Rio Mira evidenciam a importância que tem a estimação das variações da área da superfície de sapal que é influenciado pelo efeito da variação da amplitude da maré entre períodos de “Marés Vivas” e de “Marés Mortas”. Esta informação é de grande relevância para a compreensão dos processos de sedimentação que ocorrem no interior do estuário do Rio Mira e que estão interligados com a actividade das comunidades biológicas que nele habitam (Fig. 9; §I.2.). Para além disso, a obtenção destes resultados pode contribuir para prever a evolução do padrão morfossedimentar das zonas estuarinas face ao acelerar da elevação do nível médio do mar (NMM). As políticas de preservação destas zonas húmidas, localizadas junto à zona costeira, passa por criar condições para mitigar ou até evitar o seu processo de erosão, e por permitir que se mantenham as condições naturais que proporcionem a migração destes ambientes sedimentares em direcção a terra, evitando o fenómeno genericamente designado por “*Coastal squeeze*”.

III.3- Evolução da barra arenosa no sector distal do estuário do Rio Mira (2015 a 2020).

A dinâmica sedimentar que ocorre num estuário depende de vários factores e pode ser descrito considerando diferentes escalas temporais (§ Cap.1; Fig. 9). A morfologia das barras de maré (Fig. 8) está fortemente dependente da magnitude dos factores hidrodinâmicos (e.g. prisma de maré, caudal fluvial) que conjuntamente com o fornecimento sedimentar, modelam e determinam a génese e o padrão evolutivo de distintas UMFS.

Na parte terminal do estuário do Rio Mira, a jusante da ponte, surgem duas barras de maré que serão analisadas em pormenor e cuja morfologia permite identificar os principais canais de enchente e de vazante: (Fig. 17B) i) uma barra lateral (*side bar*) localizada imediatamente a jusante da ponte, com início na margem meridional do rio e que se prolonga até cerca de 590 m para jusante; e ii) uma barra arenosa em forma de U (“*U-shaped*”) localizada em frente à praia estuarina da Franquia, na margem setentrional do rio e que se prolonga em direcção à sua foz.

Convém ainda salientar que, a barra arenosa em forma de U (barra da Franquia) foi alvo de actividade antrópica tendo sido dragada em Julho de 2017 (Sociedade Polis Litoral Sudoeste, 2015), e que o sedimento daí retirado foi usado para a realimentação artificial das praias da Franquia e das Furnas.

As imagens de satélite S2 foram escolhidas para estudar a evolução morfossedimentar da barra arenosa da parte terminal do Rio Mira (barra da Franquia) porque a missão Sentinel-2 MSI teve início em 23 de Junho de 2015 com o satélite S2A, e que a partir de 7 de Março 2017 principiou a aquisição de informação remota com o satélite S2B (apresentando os dados uma resolução temporal de 5 dias e espacial de 10 m em 4 bandas). A análise desenvolvida nesta dissertação de Mestrado permitiu: i) caracterizar o padrão da reconstrução natural da barra da Franquia; ii) caracterizar a morfologia da barra arenosa imediatamente a jusante da ponte que não foi alvo de actividade antrópica; iii) identificar a configuração da praia emersa da Franquia e das

Furnas; e iv) identificar a morfologia da “barra de vazante” que marca o limite da praia submarina da Praia das Furnas (Fig. 17B).

A aplicação da metodologia descrita no capítulo II (§ II.1.4.2) baseada no índice NDWI (equação 2, McFeeters, 1996) e apresentada no fluxograma metodológico (Fig.20), permitiu definir as principais classes a jusante da ponte sobre o Rio Mira: barra arenosa (ba), praia estuarina (pe), margem do rio formada por cascalho/rocha consolidada (Mgc) e campo dunar (duna), estas classes são reconhecidas na zona de interesse delimitada pela máscara “AQUA” (Fig. 17).

	Sentinel-2	Data	Hora da BM-UTC	
1	S2A	2015-08-04	11:02;0.6m	
2	S2A	2017-06-14	11:08;1.1m	
3	S2A	2017-08-13	11:55;1.0m	t_0
4	S2B	2017-12-06	10:10;0.4m	
5	S2A	2018-05-05	11:28;1.2m	$t_{\text{barra incipiente}}$
6	S2A	2018-09-27	09:30;0.7m	$t_{\text{barra incipiente}}$
7	S2A	2018-12-26	11:05;0.6m	t_1
8	S2B	2019-02-09	11:04;0.9m	t_2
9	S2B	2019-03-11	11:06;0.9m	t_3
10	S2A	2019-09-02	10:15;0.4m	t_4
11	S2A	2020-03-10	08:56;0.2m	t_5
12	S2A	2020-06-08	09:58;0.8m	t_6
13	S2A	2020-08-07	10:29;0.9m	t_7
14	S2B	2020-08-22	10:29;0.6m	t_8

Tabela 4- Lista de imagens Sentinel-2 (S2) consideradas no estudo da evolução morfológica das barras arenosas. Sensores: S2A e S2B; BM- “Baixa-Mar”; UTC- *Universal Time Coordinated*. t_0 -Dragagem da barra arenosa em frente à praia estuarina da Franquia e realimentação da Praia das Furnas; $t_{\text{barra incipiente}}$ - barra já visível na imagem S2 RGB mas o nível da maré não permite a delimitação da sua configuração; t_1 a t_8 - datas das imagens que permitiram acompanhar a evolução da configuração da nova barra (pós-dragagem); t_2 - data próxima do levantamento topo-hidrográfico cedido pela CCDRA (06/02/2019).

Usufruindo da resolução temporal dos dados ópticos Sentinel-2, que apresentam um período de revisitação de 5 dias foram seleccionadas 14 imagens de satélite S2, entre 2015 e 2020, cuja aquisição coincidiu com períodos de BM (Tabela 4). Em alguns casos a hora da aquisição, da imagem S2 (11:21 UTC) coincide precisamente com a hora do nível mínimo da BM.

Deste conjunto de 14 imagens de satélite, 10 delas foram avaliadas visualmente comparando os resultados obtidos da classificação com base no índice NDWI e a imagem RGB. De seguida, a classificação (“*raster*”) foi vectorizada para se estimar as áreas das barras arenosas (em frente à Praia da Franquia e a jusante da ponte sobre o Rio Mira) e da Praia das Furnas (praia emersa e topo da praia submarina). A metodologia utilizada está ilustrada graficamente e em detalhe sobre a imagem S2 de 2019-09-02 (Fig. 40). Este exercício permitiu analisar o padrão de evolução morfossedimentar da barra arenosa da praia da Franquia, no período que decorreu após a dragagem que foi concluída em Julho de 2017.

As estimativas das diferentes áreas das classes incluídas na máscara “*AQUA*”, foram obtidas através da aplicação dos procedimentos anteriormente descritos e os resultados do estudo de 9 imagens são apresentados na Tabela 5.

Embora a presente metodologia tenha sido essencialmente desenvolvida para testar a aplicabilidade dos dados S2 à descrição da evolução da barra arenosa da Franquia, convém referir que ela também se revelou útil para confirmar as estimativas das áreas de zonas que não foram dragadas: i) a Praia da Vila Formosa com valores médios de 0.053 km²; e ii) a Praia da Franquia que após a realimentação apresenta valores médios de 0.03 km².

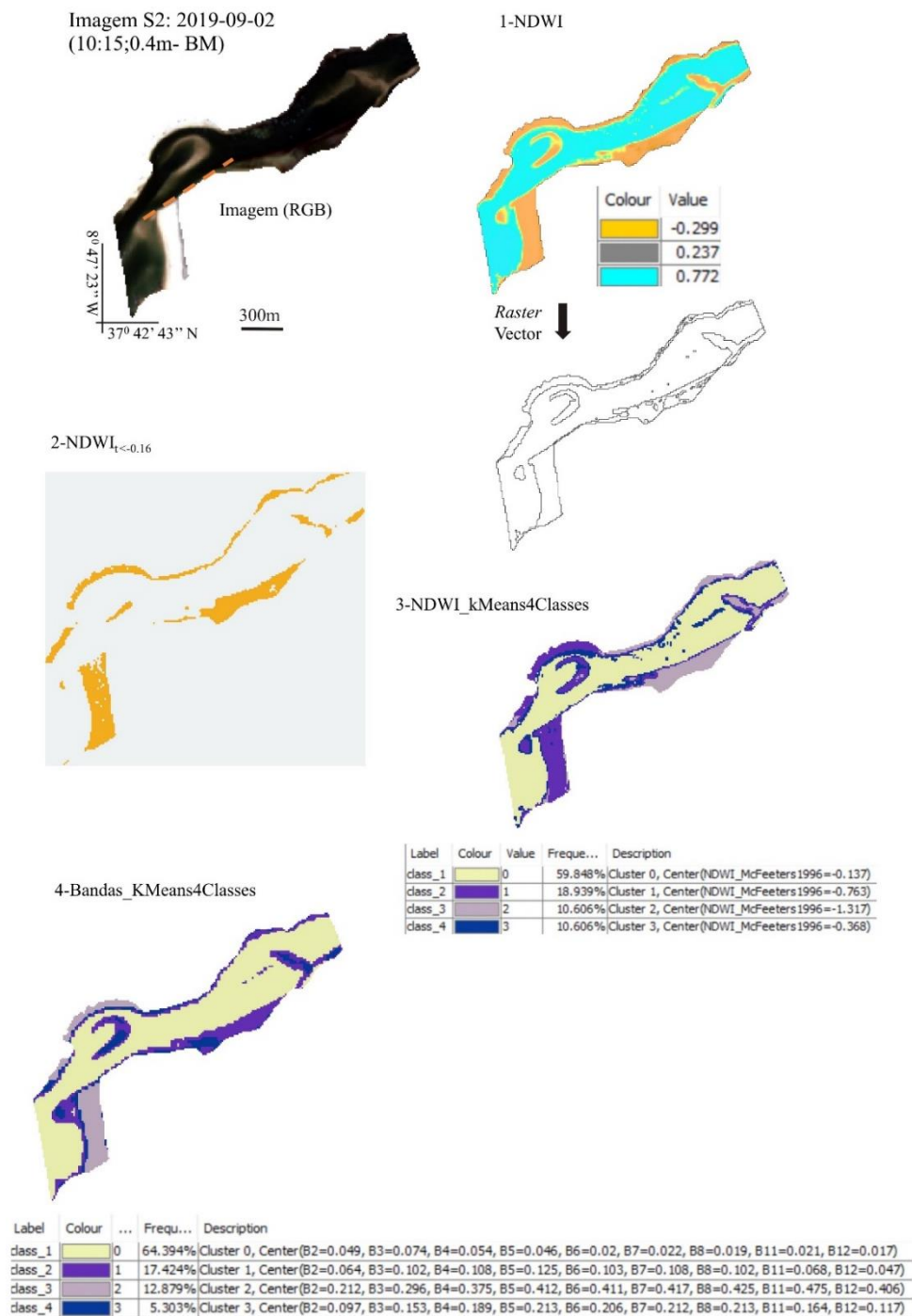


Figura 40- Ilustração da aplicação dos procedimentos para proceder à estimativa da área das classes incluídas na máscara “AQUA”, tendo por base a imagem S2 de 2019-09-02. RGB- imagem em cor natural “Red” (R), “Green” (G) e “Blue” (B); (1)- NDWI- “Normalized Difference Water Index”; (2)- Aplicação do limiar $NDWI_{\tau > -0.16}$; (3)- Classificação não supervisionada “K-Means” do índice NDWI e (4)- Classificação não supervisionada (“K-Means”; 4 classes) tendo por base as bandas: B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B11 e B12.

Data	Maré-BM/UTC	Método	Barra Arenosa Praia da		
			Praia da Franquia	Franquia	Praia das Furnas
2015-08-04	11:02;0.6m	'(4)	0.036	0.014	0.106
2018-12-26	11:05;0.6m	'(1)	0.014	0.032	0.108
2019-02-09	11:04;0.9m	'(1)	0.011	0.053	0.084
2019-03-11	11:06;0.9m	'(1)	0.010	0.049	0.087
2019-09-02	10:15;0.4m	'(1)	0.019	0.039	0.078
2020-03-10	08:56;0.2m	'(2)	0.011	0.033	0.111
2020-06-08	09:58;0.8m	'(2)	0.024	0.027	0.080
2020-08-07	10:29;0.9m	'(4)	0.019	0.025	0.085
2020-08-22	10:29;0.6m	'(4)	0.031	0.017	0.092

Tabela 5- Estimativa das áreas (km²) das principais classes cobertas pela máscara “AQUA”. (a cinzento) o polígono final incluía a totalidade da margem norte do rio, não permitindo a individualização do polígono que descrevem apenas a Praia da Franquia. BM- “Baixa-Mar” prevista para o marégrafo de Sines (<https://www.hidrografico.pt/m.mare>); UTC- *Universal Time Coordinated*.

A barra arenosa imediatamente a jusante da ponte, não tendo sido dragada, e tendo mantido uma morfologia mais estável ao longo do período de estudo, permitiu garantir a comparabilidade entre imagens de satélite sucessivas. Assim, partimos do pressuposto de que a área emersa estimada desta barra arenosa, não intervencionada artificialmente, não apresentaria variações significativas no caso de as imagens de satélite terem sido adquiridas, quando o nível da BM fosse idêntico. A Figura 41 ilustra esta análise comparativa da área da barra arenosa a jusante da ponte, cuja área emersa foi estimada em duas datas, a 2017-12-06 e a 2019-09-02, separadas por um intervalo de 21 meses. Estas duas imagens de satélite foram adquiridas durante o período de BM de marés vivas (0.4m) e à mesma hora (10:10 UTC). Neste caso, foi considerada estar garantida a possibilidade de comparar os resultados.

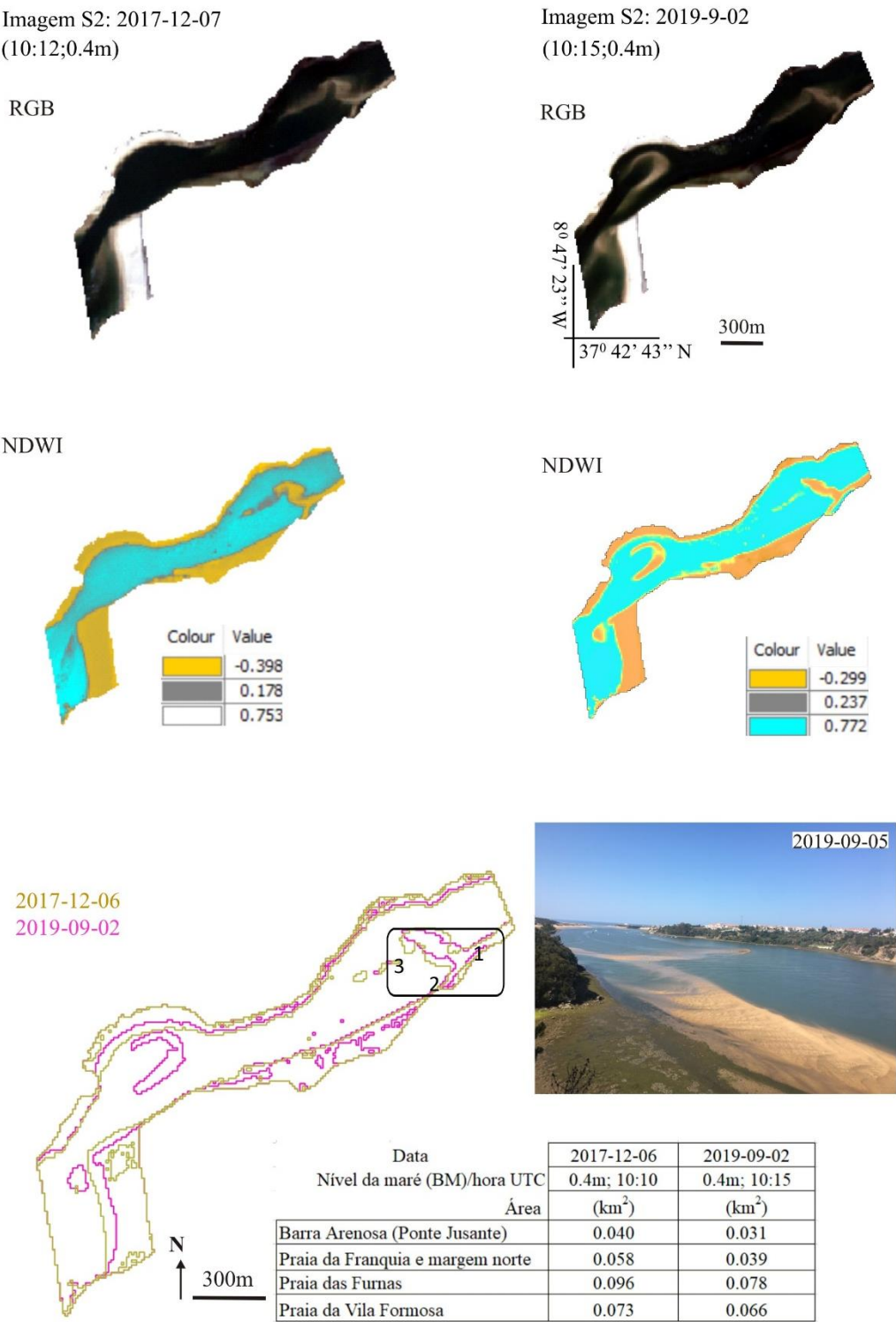


Figura 41- Avaliação da evolução morfológica e da área da barra arenosa junto à ponte do Rio Mira, com intervalo de 2 anos (2017-12-06 e 2019-09-02), em período de BM de “Marés Vivas” (0.4 m).

III.3.1- Validação do método com dados topo-hidrográficos

Esta análise comparativa também foi realizada para as áreas da barra da Franquia a jusante da ponte junto à foz do Rio Mira, tendo sido escolhidas duas imagens de satélite adquiridas em 2019-02-09 e em 2019-03-11, separadas com um intervalo temporal de 1 mês e com a particularidade de coincidirem com o mesmo nível de BM (“Marés Vivas”) de 0.9 m; 11:04 UTC, hora muito próxima da passagem do satélite Sentinel-2 (11:21 UTC). Os resultados obtidos indicam que as áreas estimadas para a barra arenosa da Franquia não são significativamente diferentes: 0.011 km² em 2019-02-09, e 0.010 km² em 2019-03-11 (Fig. 42). O mesmo se verificou nos casos: i) da barra adjacente à ponte onde a estimativa da área emersa pouco variou: 0.017 km² em 2019-02-09, e 0.016 km² em 2019-03-11; ii) da parte emersa da praia das Furnas com 0.84 km² em 2019-02-09, e com 0.87 km² em 2019-03-11; e iii) da praia estuarina da Vila Formosa com 0.53 km² em 2019-02-09, e com 0.54 km² em 2019-03-11. Estes resultados reforçam a importância de que se devesse ter em consideração o nível da maré quando se pretende usar os dados Sentinel-2 para monitorizar a evolução de unidades morfossedimentares localizadas no interior de zonas estuarinas intertidais.

Perante os resultados obtidos até aqui, e recorrendo à projecção dos polígonos que representam as áreas estudadas nas imagens de satélite disponíveis no “*GooglePro®*” e/ou “*BingSatellite*” (QGIS), a aplicabilidade da metodologia proposta parecia ser a mais adequada à monitorização de barras arenosas do estuário do Rio Mira, desde que fosse cumprida a exigência de seleccionar imagens S2 adquiridas durante o pico da BM. No entanto, para se avançar com a validação das áreas estimadas seria conveniente usar dados auxiliares com informação altimétrica (Fig. 14). Nesse sentido, foram disponibilizados dados pela CCDRALentejo (Sociedade Polis Litoral Sudoeste, 2015) respeitantes a parte do levantamento topo-hidrográfico que foi executado, em 2019-02-06, entre a foz e a ponte do Rio Mira. Este levantamento topo-hidrográfico terá coincidido com o período de BM com o nível de maré mínimo previsto de 0.8 m (09:30 UTC; IH; porto de Sines; <https://www.hidrografico.pt/m.mare>). Estes dados altimétricos serviram o propósito de proceder à comparação e validação dos resultados obtidos através do processamento dos dados Sentinel-2 (Fig. 42) usando uma das imagens S2 que foi adquirida em 2019-02-09, três dias após a realização do levantamento topo-hidrográfico.

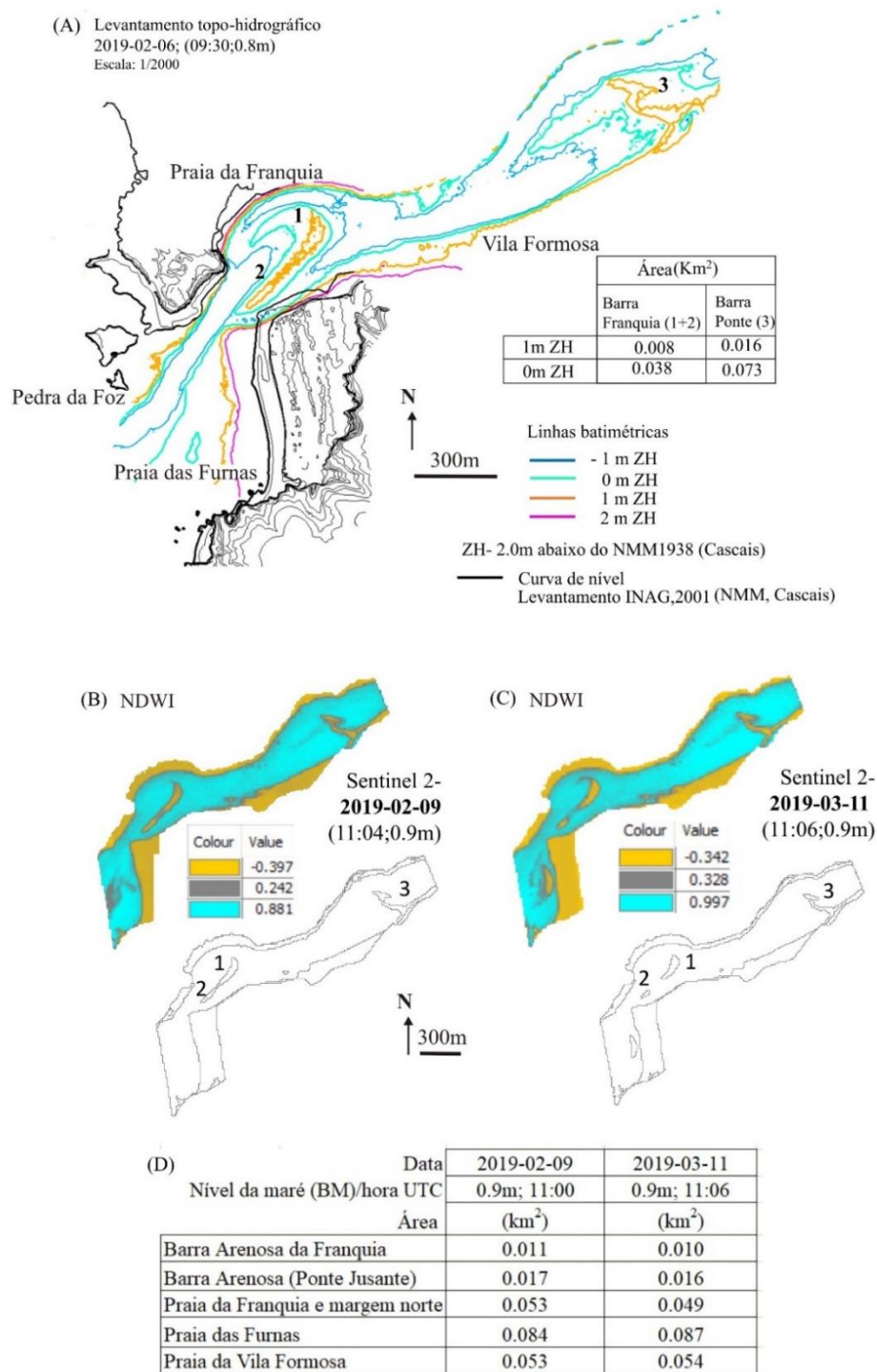


Figura 42- Análise comparativa entre os dados relativos ao: (A)- Levantamento topo-hidrográfico de 2019-02-06; (09:30; 0.8m) Escala: 1/2000; (B)- Imagem S2 de 2019-02-09 (11:04; 0.9m- BM) e (C)- Imagem S2 de 2019-03-11 (11:06; 0.9m- BM). (1-2)- Barra da Franquia; (3)- barra arenosa a jusante da ponte. Tabela com os valores das áreas estimadas.

Constatou-se através da comparação visual entre a imagem do levantamento topo-hidrográfico e a imagem S2 que existe uma notória similitude na morfologia das barras arenosas do estuário do Rio Mira. A barra arenosa da Franquia é descrita pelos dados S2 por duas pequenas barras (Fig. 42; pontos 1 e 2) quase coalescentes, e com a concavidade virada para a Praia da Franquia. A parte emersa da barra junto à ponte, apresenta-se com uma morfologia semelhante à letra grega τ (*tau* minúsculo; Fig. 42; ponto 3), e ligeiramente deflectida para montante. Ao tentar fazer a correspondência entre as morfologias acima descritas e os valores das curvas batimétricas do levantamento topo-hidrográfico de 2019-02-06, verifica-se que os dados S2 permitem descrever a área mais emersa das barras arenosas que, por sua vez, coincide com a batimétrica de 1 m ZH (*datum* altimétrico; ter em consideração que: “No território continental temos o valor do ZH de 2.00 m abaixo do NMM de Cascais 1938 para toda a costa portuguesa, com a excepção da zona do estuário do Tejo, que se situa a 2.08 m abaixo do NMM1938” *in* Antunes, 2012).

Por outro lado, observou-se que a análise comparativa entre as áreas estimadas pelos dados S2 e pelos dados do levantamento topo-hidrográfico (Fig. 42 A) para a barra arenosa da Praia da Franquia indicam uma sobreestimativa dos dados S2 com uma área de 0.011 km² em 2019-02-09, relativamente superior o valor obtido usando a batimétrica de 1m ZH que indicou uma área com 0.0078 km². No entanto, salienta-se que ao usar a batimétrica 0m ZH a área estimada de 0.038 km² é cerca de três vezes superior à estimada pela imagem S2 com 0.011 km². Este resultado sugere que o polígono que descreve a área da barra arenosa usando os dados S2 se aproxima mais da linha batimétrica 1m ZH.

No caso da barra arenosa adjacente à ponte sobre o Rio Mira (Fig. 42; ponto 3 com morfologia em “ τ ”), observa-se que para além da semelhança que existe entre a morfologia da parte emersa definida com os dados S2 ou com o levantamento topo-hidrográfico, também se nota uma aproximação significativa entre os valores das áreas estimadas: 0.017 km² e 0.016 km² (batimétrica de 1m ZH; Fig.42D), respectivamente. O maior valor da área estimada de 0.073 km² para esta barra arenosa que foi obtida usando a batimétrica 0m ZH do levantamento topo-hidrográfico, é superior em cerca de 0.035 km² às estimativas das áreas obtidas a partir da análise das imagens S2 para o dia 2017-12-06 com 0.04 km², e para o dia 2019-09-02 com 0.03 km² (Fig. 42). Pelo facto destas

duas imagens de satélite S2 terem sido adquiridas com o nível mínimo da BM de 0.4 m, foi possível distinguir parte da barra arenosa que geralmente está imersa. Pode-se afirmar que dependendo do nível da maré em que a imagem S2 é adquirida, é possível melhorar as estimativas das áreas das barras arenosas/zonas emersas *versus* zonas imersas). Para além disso, a aplicação do procedimento “*NDWI-K Means 4 classes*” ou “*BandasKmeans4class*” (Fig. 40) permitiu gerar polígonos contíguos que delimitam a área “emersa” (“areia seca”) e a área “imersa” (“areia molhada”) em zonas de praia (Fig. 40, \approx classes 3 e 4).

A análise acima descrita ajudou-nos a compreender que a estimativa das áreas das barras arenosas recorrendo a dados de imagens e satélite S2, embora sendo uma abordagem mais conservativa por gerar polígonos que descrevem com maior rigor a zona mais emersa da barra, também permite obter resultados comparáveis aos que são adquiridos através de levantamentos topo-hidrográficos. Esta coincidência nos resultados não deixa de ser surpreendente já que reconhecemos a complexidade dos diferentes métodos de aquisição e tratamento de dados topo-hidrográficos, e em particular, o grau de “subjectividade” que é praticado pelos investigadores que os realizam, e que, muitas vezes, têm de decidir sobre quais são os pontos de amostragem que melhor definem os limites das barras arenosas. Para além disso, enquanto a imagem de satélite S2 tem a vantagem de nos proporcionar uma imagem única da zona em estudo com um nível instantâneo de maré, no caso dos levantamentos topo-hidrográficos estes podem incluir o “pico” da BM mas não conseguem evitar a recolha de dados durante o período subida da maré dificultando o levantamento das zonas mais profundas.

A utilização das imagens de satélite S2 para monitorizar a evolução da barra arenosa da Praia da Franquia, entre Junho de 2015 e 2020-08-22, permitiu reunir os resultados que estão resumidos na Figura 43 e no Anexo VII.

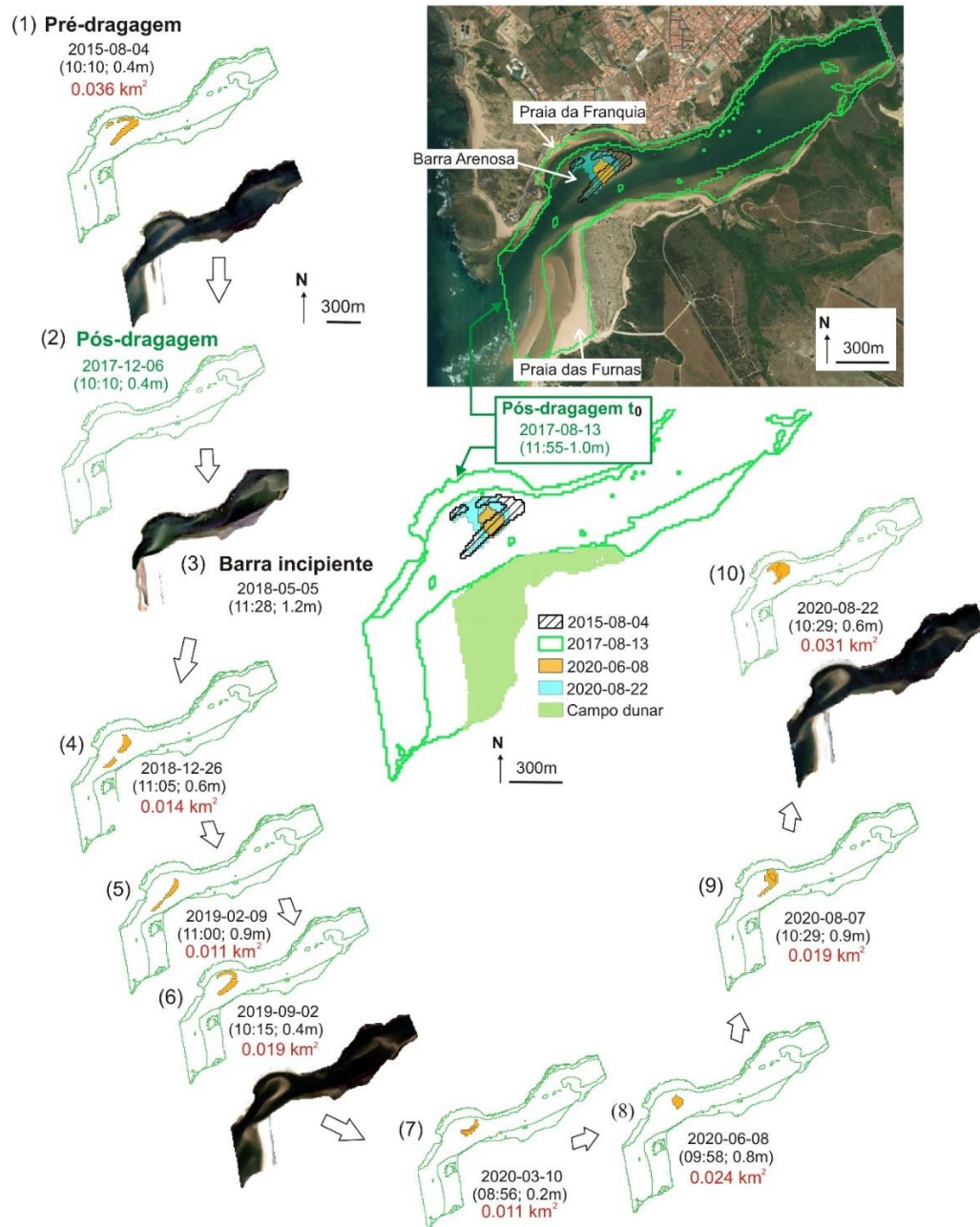


Figura 43- Evolução da morfologia da barra arenosa da Praia da Franquia entre 8 de Agosto de 2015 e 22 de Agosto de 2020. A morfologia da barra é representada pelo vector a cor-de-laranja (área km², Tabela 5), sobre o vector de contorno a verde (1 a 10) referente à imagem S2- 2017-12-06 (10:10-0.4m). Em A e B o vector verde de contorno refere-se à imagem S2- 2017-08-13. Em 1;3; 6 e 10 é apresentada a imagem RGB-Sentinel-2). A imagem de fundo do Google Earth Pro é do dia 2014-06-01.

Na Tabela 6 podemos verificar que os valores relativos à evolução da área da barra arenosa da Franquia indicam que a 2015-08-04 a área emersa desta barra seria de 0.036 km². As primeiras imagens Sentinel-2 que permitem identificar o aparecimento de uma nova barra incipiente, de morfologia linear e disposta de forma transversal ao canal principal de escoamento, correspondem à imagem RGB de 2018-05-05 (Fig. 43; 3 e ANEXO VII), 10 meses após a dragagem de Julho de 2017. Contudo, esta imagem S2 não é a ideal para realizar esta análise porque não coincide com o nível de BM elevado (11:28 UTC; 1.2m). Somente mais tarde, na imagem S2 de 2018-12-26 (11:05 UTC; 0.6m-BM), 17 meses após a dragagem é que foi possível estimar a área da nova barra arenosa, com 0.014 km² (Fig. 43; 4). A área da barra arenosa continuou a aumentar alcançando 0.019 km² em 2019-09-02, passados 9 meses da estimativa anterior. Mais tarde, em 2020-03-10, decorridos mais 5 meses, a área estimada da área arenosa decresceu ligeiramente para 0.011km², atingindo três meses depois um novo máximo de 0.024 km² em 2020-06-08. Nesta última data a imagem RGB mostra claramente a extensão desta barra arenosa já com a configuração em forma de “U” com a convexidade virada para montante. A parte central emersa do “U” está a uma cota mais elevada do que os seus “braços” que por isso estão cobertos, em grande parte, por uma coluna de água de baixa profundidade. Nos dois meses seguintes a evolução da barra arenosa em forma de “U”, pode ser observada na imagem S2 de 2020-08-07 (Fig. 43; 9) com a rotação da sua convexidade em direcção à Praia da Franquia, acompanhada por uma ligeira diminuição da área estimada, agora com 0.019 km². Como não se dispõe de dados volumétricos, sugere-se que uma parte do volume de sedimentos desta barra arenosa poderá ter sido transportado para a “convexidade” do “U”, levando ao acréscimo da altimetria da sua parte central emersa, bem visível na imagem de 2020-08-22 (Fig. 43; 10).

A análise da evolução morfológica do efeito da realimentação da Praia da Franquia tornou-se por vezes complicada pois a metodologia escolhida gerava vários polígonos de pequena área. Apesar dessa dificuldade foi possível estimar a área do areal da Praia da Franquia como sendo de 0.014 km² em 2015-08-05 antes da intervenção antrópica (Tabela 5). Mais tarde em 2018-12-26, 17 meses após a dragagem, a área aumentou para 0.032 km². Na imagem de satélite S2 de 2019-09-02 o valor da área estimada subiu ligeiramente para 0.033 km², possivelmente porque nesta data a imagem S2 coincide com o nível da BM que foi particularmente baixo (0.4 m). Passados 5 meses

a área do areal da Praia da Franquia manteve-se nos 0.033 km² em 2020-03-10, diminuindo três meses depois para 0.027 km² em 2020-06-08, e decrescendo ligeiramente para 0.025 km² em 2020-08-07. Apesar desta diminuição a área da praia emersa da Franquia apresenta um valor superior ao que tinha em 2015-08-05, antes da realimentação.

A visualização do padrão da evolução morfossedimentar da barra arenosa da Franquia, revela-nos o grande potencial dos dados Sentinel-2 no que refere à sua resolução temporal e espectral. As imagens RGB obtidas, só por si, são reveladoras das mudanças ocorridas na barra arenosa junto à foz, assim como das mudanças ocorridas no areal das praias realimentadas da Franquia e das Furnas (Tabela 6). Na Praia das Furnas é possível acompanhar a evolução da configuração da zona emersa e imersa em função da evolução da “barra de vazante” que condiciona a refração das ondas predominantes. A configuração de equilíbrio desta praia é ainda condicionada pela acção das correntes de enchente e de vazante, bem como pela difracção das ondas na “Pedra da Foz” tal como descrevem Gama (2005) e Gama et al. (2011).

Os valores das áreas estimadas para a Praia das Furnas (Tabela 5) revelam oscilações significativas. Porém, pode afirmar-se que esta praia manteve uma configuração próxima da que caracteriza a etapa final do processo de realimentação. Esta configuração só se alterou de forma significativa em 2020-03-10, 29 meses após a realimentação, apresentando uma área de 0.11 km². Nesta imagem de satélite S2 verifica-se que: i) as áreas estimadas para a praia emersa (“areia seca”) e imersa (“areia molhada”) apresentam valores muito próximos (Tabela 5); ii) a área total é ainda superior à existente antes da realimentação; e iii) a configuração da praia emersa apresenta-se significativamente mais larga no seu limite meridional. Nos meses seguintes de Junho e Agosto de 2020, observa-se nas imagens S2 uma recuperação da configuração padrão da praia emersa, mas com uma tendência de decréscimo da área da praia que apresenta 0.092 km² em 2020-08-22.

Também é possível constatar que a máscara “AQUA” não revelou variações da área do campo dunar contíguo à Praia das Furnas. No entanto, é evidente que ocorreu erosão de parte da praia emersa que está virada para o Rio Mira e da base da duna que lhe está adjacente (Fig. 40; linha cor-de-laranja a tracejado). Este resultado é comprovado

quando se procede à análise comparativa com fotografias obtidas durante campanhas de levantamento de campo (Fig. 44), e também através da análise comparativa com levantamentos de GPS que foram realizados em 2006 e 2008 (Gama, 2005; Baptista et al., 2011).



Figura 44- Ilustração do recuo do limite setentrional do campo dunar adjacente à Praia das Furnas. Levantamento topo-hidrográfico 2019-02-06 (Fig. 42) e fotografias obtidas nas campanhas de campo de 2019-12-26.

Por último, ainda em ambiente estuarino, na Praia da Vila Formosa a estimativa da sua área não varia muito do valor médio de 0.053 km².

Resumidamente, podemos afirmar que a análise dos padrões de evolução morfossedimentar da barra arenosa da Franquia e das praias estuarinas do Rio Mira usando imagens de satélite Sentinel-2, pode ser muito útil para a monitorização de intervenções antrópicas relativas a processos de dragagem e de realimentação. No entanto, caso se pretendam estimar e comparar áreas entre datas consecutivas, convém ter em consideração que as imagens S2 a seleccionar para este fim, devem coincidir com o pico da BM, e se possível com a BM mínima de “Marés-Vivas”. Caso se cumpra este critério, os valores das áreas estimadas com dados de detecção remota S2 podem ser interpretadas como coincidentes com a linha batimétrica 1.0m ZH (*datum* altimétrico do levantamento topo-hidrográfico).

Finalmente, também se verificou que os dados ópticos Sentinel-2 apresentam uma resolução espacial e temporal que é adequada para a monitorização e a descrição da evolução do padrão morfossedimentar de uma barra arenosa, localizada em ambiente estuarino distal, e que tenha passado por um processo de dragagem. A análise de 9 imagens de satélite que foram adquiridas durante o nível de BM demonstrou ser útil para o estudo evolutivo da morfologia da barra arenosa da Praia da Franquia entre 2015 e 2020. Convém ainda referir que os resultados obtidos poderão ser usados para desenvolver um estudo de dinâmica sedimentar estuarina mais completo, se forem complementados com informação relativa à velocidade das correntes induzidas pela onda de maré e ao caudal do Rio Mira. A análise aqui apresentada demonstrou que a confiabilidade dos dados que são obtidos usando imagens S2 pode ser avaliada através da comparação das áreas estimadas para zonas do estuário que não sofreram dragagem e/ou realimentação artificial, pois neste caso revelou variações de poucos pixéis entre imagens S2 adquiridas em datas de BM sucessivas.

III.4- Identificação do padrão evolutivo do sapal e do raso de maré à escala temporal de 24 anos (1986-2010, Landsat 5TM)

No capítulo §II e no fluxograma metodológico da Figura 14 é apresentada de forma sucinta a metodologia desenvolvida por Laengner et al. (2019, 2020) para estudar zonas estuarinas. Este método recorre a imagens Landsat 5 TM que estão disponíveis na plataforma “*Google Earth Engine*” (GEE) para definir o padrão de zonas húmidas estuarinas (“*wetlands*”), que incluem as classes de sapal (“*saltmarsh*”), raso de maré sem “ervas marinhas” (“*mudflat-unvegetated*”) e água (“*water*”). O “*script*” desenvolvido por Laengner et al. (2019) permite aceder ao catálogo das imagens Landsat 5 TM (imagens de satélite adquiridas entre 1986 e 2010) disponíveis na plataforma GEE (Anexo I), e também, a ter acesso à forma de cálculo das bandas derivadas NDVI (“*Normalized Difference Vegetation Index*”) e NDWI (“*Normalized Difference Water Index*”). Este “*script*” executa uma classificação não supervisionada (árvore de decisão) que utiliza os limiares do índice NDVI ($NDVI_{\tau > 0.3}$) para mapear as áreas de sapal e o limiar do índice NDWI ($NDWI_{\tau > 0}$) para definir as áreas cobertas pela classe água (§ II.1.6). A diferença entre estas duas classes define a classe de raso de maré, admitindo que esta não está coberta por “ervas marinhas” (Fig. 22B).

No que diz respeito ao presente estudo, após ter sido executada a alteração do “*script*” de base foi possível estimar as áreas ocupadas pelas classes: sapal; raso de maré e água para a máscara que limita a área entre a foz do Rio Mira e a Cerca ($\approx 3.14 \text{ km}^2$; § II; Fig.16 B), nos últimos 24 anos (1986-2010). Na Figura 45 cada imagem reproduz o padrão de distribuição de cada uma das 3 classes para cada 3 anos (“*3-year time steps*”). A tabela da Figura 45 resume as áreas (km^2) estimadas para cada período de 3 anos.

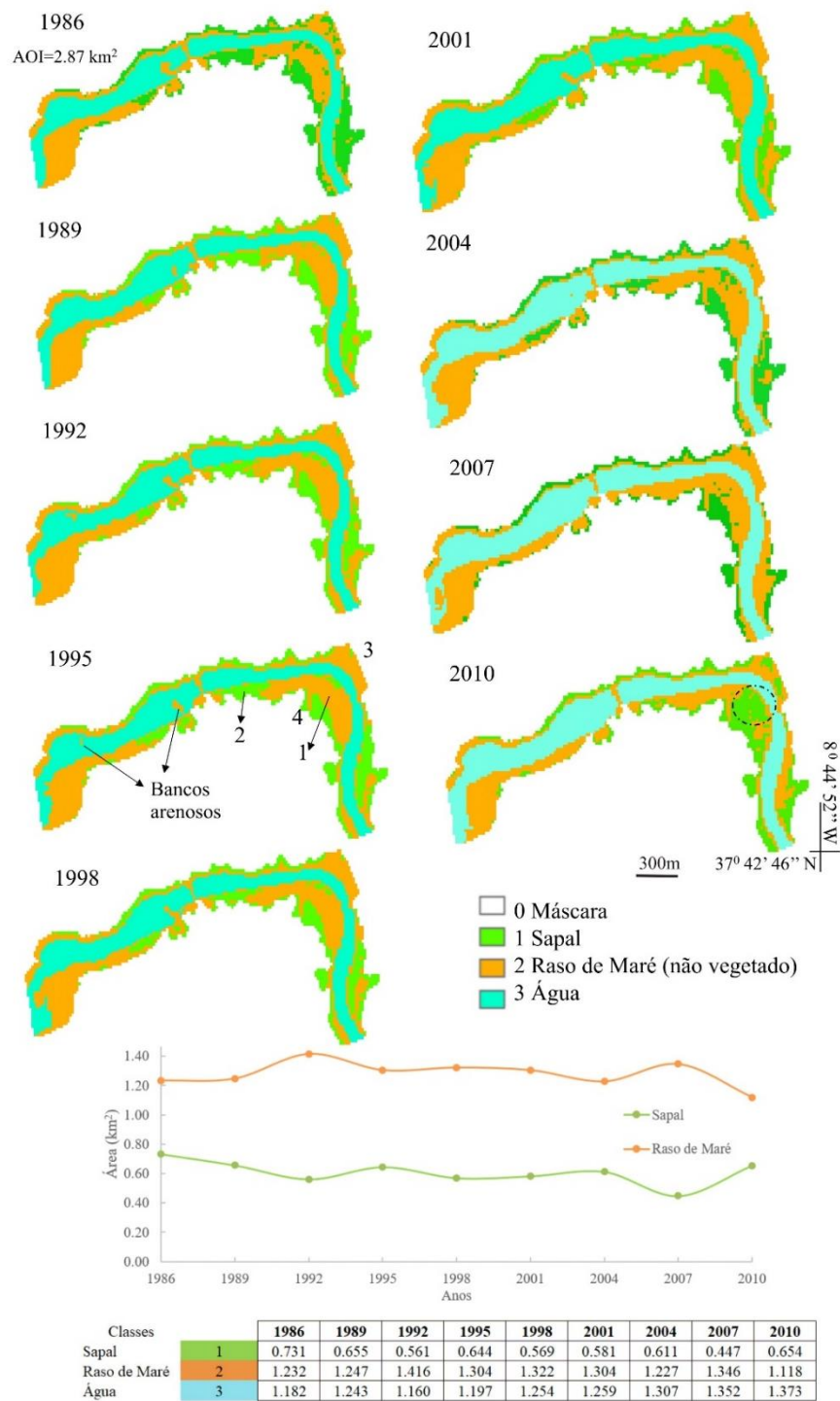


Figura 45- Resultados da aplicação da metodologia de classificação de Laengner et al. (2019): Mapas tri-anuais da cobertura das classes de sapal; raso de maré e água, entre 1986 e 2010. Gráfico e Tabela da evolução da área em km²). Dados Landsat 5 TM, “GEE”).

Considerando que o padrão de evolução morfossedimentar da classe sapal é a que melhor descreve a tendência evolutiva das zonas estuarinas, os resultados obtidos permitem afirmar que a área de sapal diminuiu em cerca de 0.08 km^2 nos últimos 24 anos. Esta tendência de decréscimo da área de sapal está em linha de conta com o que se verifica na maioria das zonas húmidas estuarinas. Contudo, o gráfico da Figura 45 (e a tabela na base da imagem) também nos mostra que a curva relativa ao raso de maré apresenta um “traçado” quase simétrico em relação ao descrito pela classe sapal. Este comportamento das curvas sugere que ao longo destes 24 anos a diminuição da área de sapal é acompanhada pelo aumento da classe raso de maré. Na verdade, o processo de evolução sedimentar dos estuários tendem a apresentar esta tendência evolutiva que se caracteriza a longo prazo pela substituição das áreas de sapal que sofreram uma degradação contínua por áreas de raso de maré. Verifica-se ainda que, no triénio 1992-1995, ter-se-á dado um aumento da área de sapal da ordem dos 0.08 km^2 , e que no triénio 2007-2010 esse valor teria sido de 0.21 km^2 , registando-se o maior incremento na área 1 (Fig. 45). O facto do modelo usado na caracterização da zona estuarina húmida (“*wetland*”) considerar apenas três classes, remete-nos necessariamente para a análise das imagens da classificação obtida para cada triénio (Fig. 45), e para a necessidade de realizar uma análise comparativa complementar com dados auxiliares (i.e. fotografia aérea).

III.4.1- Análise comparativa com dados de fotografia aérea

O padrão de distribuição da classe de sapal permite concluir que esta classe soma áreas de verdadeiro alto sapal (Fig. 45; e.g. área 1 e Montalvo), com áreas de raso de maré junto à água que apresentam uma elevada cobertura de “ervas marinhas”. Isto acontece pelo simples facto do índice NDVI atingir nestas áreas valores superiores a 0.3, tal como foi descrito anteriormente para os dados Sentinel-2 (Fig. 27). Este resultado é confirmado pela observação de fotografias aéreas à escala 1:15 000 de 1995 e de 2000 (Fig. 46).

Na Figura 46 podemos ver que as áreas de alto sapal (e.g. área 4) são classificadas como “sapal”, mas que a classificação não as distingue das áreas de raso de maré, cobertas por “ervas marinhas”. Na área 1 o sapal é mais desenvolvido do que na área 2, contudo a área

2 é classificada como sapal e a área 1 como raso de maré. Através da análise comparativa com a fotografia aérea de 1995, constata-se que a classe de raso de maré inclui praias estuarinas, dunas, os “bancos arenosos”, e para além disso, inclui a própria ponte sobre o Rio Mira, não se restringindo por isso às verdadeiras zonas intertidais.

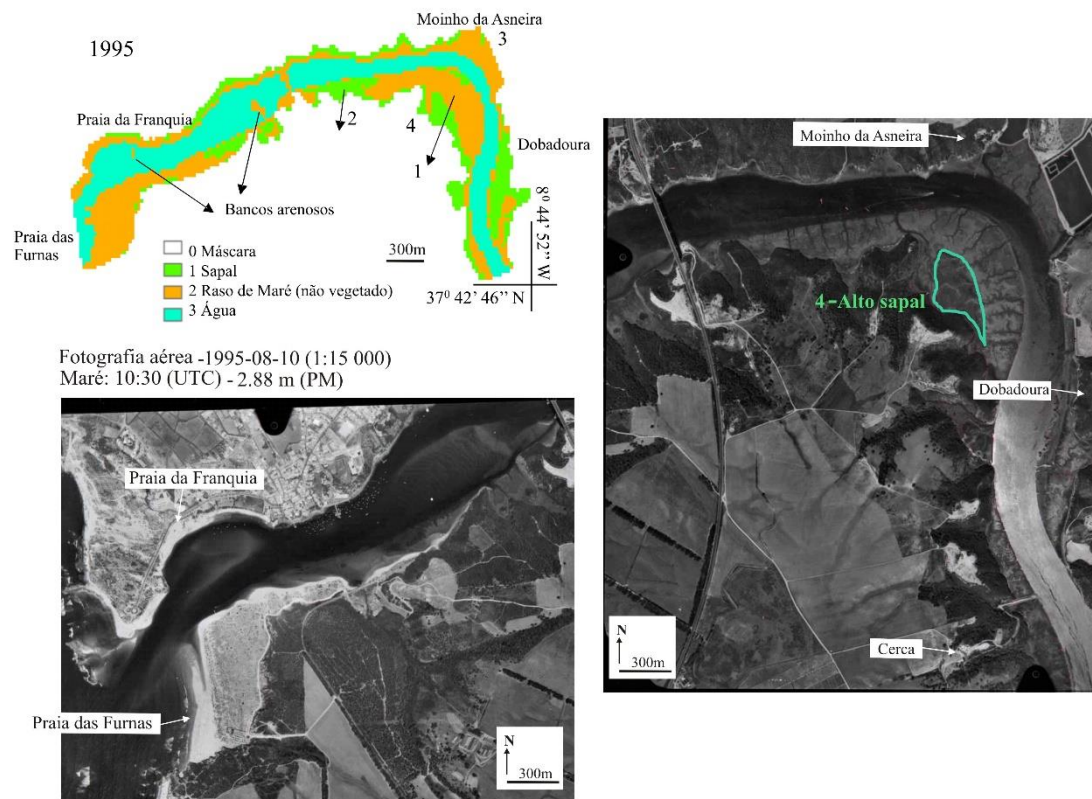


Figura 46- Análise comparativa da classificação Laengner et al. (2019), baseada em dados Landsat 5 TM para o ano de 1995 *versus* a fotografia aérea de 1995 (escala 1:15 000). (4) Alto sapal delimitado com a linha verde.

Na Figura 47, a fotografia aérea de 2001 permite que realizemos uma comparação com os dados relativos ao processamento das imagens Landsat 5 TM, uma vez que cada “*raster*” de classificação (Fig. 46) descreve o padrão evolutivo de 3 anos consecutivos.

A análise comparativa aqui apresentada permite realçar que as áreas com “verdadeiro” sapal (1, 3 e 4) apenas são assinaladas na classificação se forem coincidentes com áreas de alto sapal (4) ou onde o raso de maré está coberto por “ervas marinhas” (2).

Contrariamente, a área 2 que sobressai na classificação como sendo uma extensa área de sapal junto à margem do rio, não é confirmada pela fotografia área de 2001 (C) onde é evidente que grande parte desta área 2 corresponde ao raso de maré coberto por “ervas marinhas”, e que a área contígua mais a leste, apesar de apresentar canais de maré entre manchas de vegetação de baixo sapal, deve ser classificada como raso de maré.

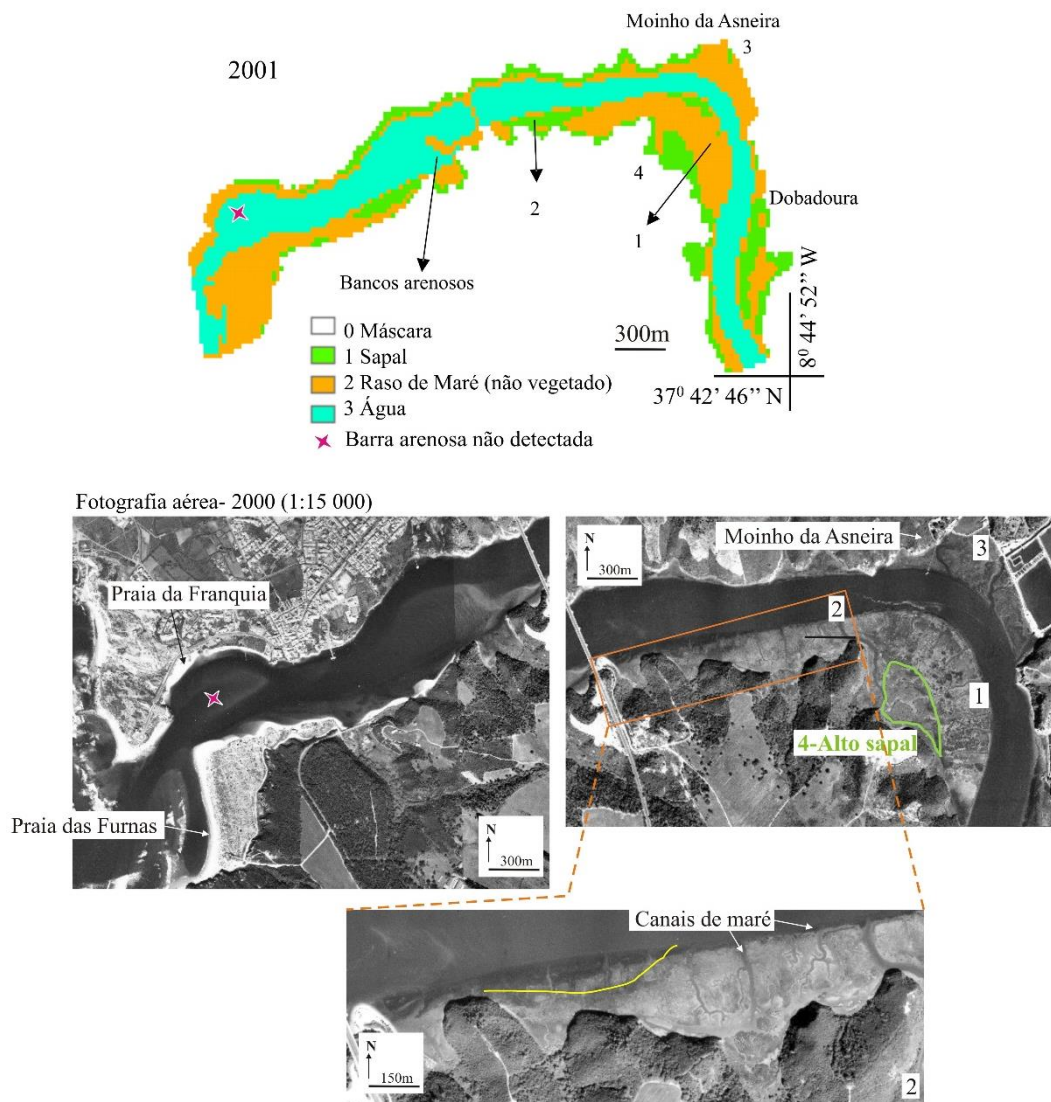


Figura 47- Análise comparativa da classificação Laengner et al. (2019), baseada em dados Landsat 5 TM para o ano de 2001 *versus* fotografia aérea de 2001 (escala 1:15 000). A linha a amarelo indica a zona coberta por “ervas marinhas”.

Dado o acima descrito, as classes de sapal e de raso de maré devem ser entendidas em *sensu lato* quando usamos a metodologia de Laengner et al. (2019) aplicada a dados Landsat 5 TM. Nas Figuras 46 e 47, a classe de raso de maré inclui o raso de maré sem “ervas marinhas” (coberto por silte e argila; i.e; *bare tidal flat*), mas também outras áreas que correspondem às praias estuarinas, ao campo dunar, à margem estuarina rochosa e até mesmo à ponte sobre o Rio Mira. Nesta classificação, a área das barras arenosas que são visíveis em períodos de BM, imediatamente a jusante da ponte e junto à foz do rio Mira, é igualmente incluída na classe de raso de maré. Para além disso, as barras arenosas nem sempre são “detectadas”, o que pode induzir à conclusão errónea de que em determinadas datas estas barras não existiriam no estuário do Rio Mira (e.g. classificação de 2004, de 2007 e de 2010). A inexistência das barras arenosas é desmentida pela observação das fotografias aéreas de 1995 e de 2001 (Figs. 46 e 47), e pela imagem de satélite do “*Google Earth Pro*” de 2009-10-08. Esta ausência de exactidão pode ser justificada pela menor resolução espacial e temporal dos dados Landsat 5 TM, 30 m e 16 dias, respectivamente, razão pela qual o algoritmo não selecciona as imagens coincidentes com o pico da BM, apesar de cumprir o critério de limiar de frequência de classificação superior a 85% (Fig. 22 B). Na maioria das classificações resultantes deste procedimento (Fig. 45), apenas é reconhecida a barra arenosa a jusante da ponte do Rio Mira, sem que seja possível obter informação relevante quanto à sua morfologia ou à evolução do seu padrão morfossedimentar.

Considerando o acima descrito, é possível advertir que os resultados obtidos a partir da aplicação do método de Laengner et al. (2019) devem ser verificados e confrontados com informação proveniente de outras fontes (e.g. fotografia aérea ou imagens de satélite do “*Google Earth Pro*”), em particular se pretendermos estudar estuários de pequenas dimensões onde a estimativa de “pequenas” áreas através da aplicação deste método por si só pode conduzir a conclusões erróneas.

Resumindo, a metodologia desenvolvida por Laengner et al. (2019) é bastante interessante na medida em que o “*Google Earth Engine*” (*GEE*) permite aceder a uma série muito significativa de imagens de satélite obtidas noutros programas (e.g. Landsat), estendendo a resolução temporal dos dados Sentinel-2. Porém, a sua resolução espacial de 30 m pode ser restritiva no estudo de estuários de pequenas dimensões de que é

exemplo o estuário do Rio Mira, que inclui áreas de sapal/raso de maré contíguas e de pequena extensão. Para além disso, se a aplicação do limiar NDWI (Fig. 22B) possibilitar a selecção de imagens de satélite com um nível de maré elevado poderemos estar a comprometer os resultados finais, i.e., neste caso a variabilidade das áreas ocupadas pelas classes descritivas do estuário pode ser sobre- ou subvalorizada porque a sua delimitação está fortemente dependente do nível de maré em que foram adquiridas as imagens de satélite a analisar. Convém referir que esta abordagem de Laengner et al. (2019) assemelha-se ao que é usado nas “*Earth Engine Apps*” (e.g. <https://www.intertidal.app/>) que visam a caracterização de extensas áreas costeiras húmidas (“*wetlands*”), usando uma abordagem onde o detalhe exigido na caracterização das áreas estudadas será menor já que o objectivo principal é o de detectar modificações muito significativas e para escalas temporais mais longas.

Capítulo IV. Conclusões

Neste capítulo final são apresentadas as principais conclusões desta dissertação de Mestrado.

1. A geomorfologia do estuário do Rio Mira e o modo como o seu traçado pode estar condicionado pela Geologia foi analisado usando informação topográfica e a cartografia geológica disponível. A análise do relevo em ambiente ArcGIS através da criação de um MDT foi realizada em conjunto com a informação contida no mapa geológico (escala 1/200.000) existente para a região de Vila Nova de Milfontes-Cercal-São Luís onde se individualizam diferentes tipos de rochas, mais ou menos resistentes à erosão, e distintos sistemas de falhas principais. Esta análise permitiu demonstrar que existe um controle litológico e estrutural que condiciona a evolução do relevo na plataforma litoral antiga (i.e. plio-pleistocénica), e em particular, o encaixe do Rio Mira. Usando a ferramenta “*hillshade*” do ArcGIS (“*Spatial Analyst*”) foi possível definir um padrão principal de alinhamentos de relevo que correspondem a sistema de falhas com orientação WNW-ESE e NNW-SSE. Estas falhas condicionam o escalonamento da plataforma litoral antiga em diferentes blocos de crosta, bem como, a orientação da Serra do Cercal e o traçado do talvegue principal do estuário do Rio Mira. As litologias mais resistentes à erosão constituem relevos de dureza (i.e. rochas devónicas mais resistentes à erosão que predominam na Serra do Cercal), contrastando com as que constituem a planície litoral antiga (i.e. rochas plio-pleistocénicas e carbónicas menos resistentes) onde se encaixou o Rio Mira.

2. O estuário do Rio Mira está claramente condicionado pelos sistemas de falhas com orientação NNW-SSE (troço mais a sul) e WNW-ESE (troço terminal perto da foz). O efeito na maré dinâmica que se faz sentir a Sudoeste de Odemira, a cerca de 40 km a montante da foz do Rio Mira, onde o rio desagua no Oceano Atlântico, poderá ser influenciada pelo traçado irregular deste curso de água cuja nascente se localiza na Serra do Caldeirão. A metodologia desenvolvida para analisar a informação topográfica e a

geológica permitiu elaborar uma sequência de figuras ilustrando as principais relações entre a informação geológica de superfície, as formas de relevo e em particular, a influência que os sistemas de falhas exercem sobre o traçado do troço do estuário do Rio Mira.

3. O facto de os dados de Detecção Remota Sentinel-2 serem de fácil acesso e de apresentarem uma adequada resolução temporal, espacial, espectral e radiométrica permitiu demonstrar que são uma fonte de informação geográfica muito importante para a caracterização, monitorização e gestão da evolução de zonas estuarinas sujeitas ou não à actividade antrópica. Ao usarmos informação do Sentinel-2 para estudar o estuário do Rio Mira verificou-se que a sua resolução temporal (cinco dias) foi útil para seleccionar um significativo número de imagens de satélite adquiridas durante o pico da BM. Este facto é muito relevante porque se trata de uma condição essencial para se conseguir ter sucesso na caracterização e monitorização da evolução morfodinâmica das zonas intertidais, e em particular em estuários de pequenas dimensões, de que é exemplo o estuário do Rio Mira.

4. As metodologias baseadas nos índices espectrais o NDVI e o NDWI que são comumente aplicadas em estudos de Detecção Remota em ambientes estuarinos, foram escolhidas para usar neste estudo de modo a permitir: i) a identificação das principais classes da parte terminal do estuário do Rio Mira; e ii) a caracterização do padrão evolutivo das unidades morfossedimentares (UMFS) à escala temporal de 5 anos com base em dados Sentinel-2; neste caso recorreu-se à utilização de bandas derivadas, à aplicação de limiares às mesmas e à classificação não supervisionada (“*K-Means*”) de índices ou de conjuntos de bandas espectrais. A metodologia aqui desenvolvida foi eficaz para caracterizar cada uma das classes (raso de maré, sapal, barra arenosa, praia estuarina, duna e margem do rio), inicialmente consideradas como essenciais à descrição e monitorização UMFS mais importantes da parte terminal do estuário do Rio Mira.

5. A metodologia empregue usando os dados Sentinel-2 permitiu a obtenção de um mapa das principais classes que cobrem a zona intertidal do estuário do Rio Mira, com uma área total estimada em cerca de 1.77 km². Esta abordagem foi essencial para distinguir as zonas intertidais localizadas a jusante e a montante da ponte sobre o Rio

Mira. A estimativa da extensão real da classe de raso de maré na zona intertidal, foi obtida através da análise de uma imagem de 2018-03-21 que serviu de “proxy”. Nesta imagem de satélite foi reconhecida uma elevada concentração de sedimentos finos em suspensão na água que cobre o raso de maré; este facto funcionou como um filtro para a cobertura de “ervas marinhas”, que em determinados locais cobrem o raso de maré alterando a sua assinatura espectral.

6. A montante da ponte sobre o Rio Mira, a classe de raso de maré ($\approx 0.50 \text{ km}^2$) que é maioritariamente constituída por sedimentos silto-argilosos que estão cobertos, em maior ou menor percentagem, por “ervas marinhas” (e.g. *Zostera spp.*) foi dividida em várias sub-setores em função da presença ou ausência de “cobertura” vegetal. Foi ainda possível criar mapas que mostram a distribuição de diferentes áreas de sapal ($\approx 0.96 \text{ km}^2$), com níveis altimétricos distintos, e caracterizados por uma elevada complexidade no que se refere à vegetação halófitas.

7. A jusante da ponte sobre o Rio Mira, a classe de raso de maré adquire características sedimentológicas distintas verificando-se um aumento da quantidade da fracção mais grosseira de areia e de silte (0.04 km^2) e a diminuição da sua cobertura por “ervas marinhas”. No entanto, na margem meridional junto à praia estuarina da Vila Formosa, ainda se observa que o raso de maré pode estar coberto por *Zostera spp.* e por algas (“ervas marinhas”; 0.03 km^2). Regista-se ainda que, a área de raso de maré que existia no limite oriental da Praia da Franquia foi coberto por areia aquando da realimentação da Praia da Franquia em Junho/Julho de 2017.

8. Os dados Sentinel-2 analisados para o período compreendido entre Agosto de 2015 e Setembro de 2019 revelaram que: i) existem variações significativas na estimativa da área de raso de maré que está coberta por “ervas marinhas” (e.g. *Zostera spp.*); este facto pode dificultar a definição do seu limite com o sapal, e desta forma, conduzir a interpretações erróneas quanto à extensão das áreas de baixo sapal; e ii) em direcção à foz do Rio Mira (i.e. para jusante) a área ocupada pelo baixo sapal torna-se progressivamente mais descontínua, adquirindo um padrão em “manchas” (0.09 km^2 , em Setembro de 2019), que são bem evidentes entre a zona imediatamente a montante da ponte sobre o Rio Mira e o Moinho das Asneiras.

9. A análise comparativa da extensão da área intertidal inundada durante o pico da PM de “Marés Vivas” *versus* “Marés Mortas” usando dados Sentinel-2, permitiu estimar áreas da superfície intertidal total coberta pelo alto sapal (0.36 km^2), médio sapal (0.26 km^2) e baixo sapal (0.34 km^2).

10. Com base nos dados Sentinel-2 constatou-se que as praias estuarinas do Rio Mira ocupam cerca de 0.17 km^2 , enquanto a praia emersa oceânica ocupa aproximadamente 0.03 km^2 , e o campo dunar adjacente cerca de 0.16 km^2 . As estimativas da área que foram obtidas para estas classes permitiram demonstrar que: i) a Praia da Franquia permaneceu estável após o processo de realimentação artificial concluído em Julho de 2017; e ii) a Praia das Furnas, localizada a Sul da foz do Rio Mira, manteve a mesma configuração da área emersa no período pós-realimentação artificial; no entanto, verificou-se que na imagem de satélite de Março de 2020 que a área emersa se tornou mais larga a Sul e que estreitou a Norte (i.e. junto à foz do Rio Mira); a partir de Março de 2020, os dados Sentinel-2 registam que a área da praia emersa diminuiu, sendo evidente o acentuar do recuo da base da duna no limite setentrional do campo dunar contíguo à Praia das Furnas. Este padrão evolutivo morfossedimentar observado parece ser indicativo da importância das trocas sedimentares entre a barra de vazante e a praia imersa.

11. Os mapas que ilustram a evolução das barras arenosas (0.04 km^2) da parte terminal do estuário do Rio Mira, resultaram da análise de imagens de satélite Sentinel-2, adquiridas entre 2015 e 2020. Esta análise incluiu o período de 2017 em que a barra arenosa em frente à Praia da Franquia foi dragada, e os sedimentos daí retirados serviram para realimentar as praias da Franquia e das Furnas. As áreas emersas das barras arenosas foram estimadas seleccionando as imagens Sentinel-2 que coincidem com o nível mínimo da BM. O padrão evolutivo morfossedimentar que foi identificado mostrou que: i) a barra lateral que existe na margem meridional do Rio Mira, imediatamente a jusante da ponte, permaneceu estável; esta barra arenosa parece servir de barreira de protecção à erosão a duas pequenas áreas de sapal que ocupam duas reentrâncias na margem meridional do Rio Mira; ii) a barra arenosa localizada em frente à Praia da Franquia, que apresentava em 2015 uma morfologia em “U”, foi alvo de uma dragagem em 2017, e somente reapareceu nas imagens de satélite nove meses, depois 2018-05-05; a “reconstrução” natural desta barra arenosa, após a intervenção antrópica, começou pela formação de uma

barra linear que evoluiu para uma morfologia em “meia-lua” com a concavidade virada para a Praia da Franquia; em 2020-08-07, três anos após a dragagem da antiga barra arenosa, reconheceu-se uma nova barra arenosa numa posição mais próxima da Praia da Franquia e com configuração em “U” com a convexidade virada para montante; a parte mais elevada em termos altimétricos da nova barra arenosa coincide com a parte central da convexidade da forma em “U”, sendo os seus “braços” laterais paralelos às principais correntes de vazante, repondo uma configuração muito semelhante à descrita em 2015, anterior à dragagem.

12. A resolução temporal dos dados das imagens de satélite Sentinel-2 foi útil para identificar variações na configuração das barras arenosas com um espaçamento temporal mínimo de dois meses. As áreas estimadas com os dados S2 em 2019-02-09 foram validados com dados topo-hidrográficos obtidos três dias antes (2019-02-06), podendo-se afirmar que a estimativa da área emersa usando os dados S2 (índice NDWI vectorizado) é comparável à batimétrica 1m ZH (*datum* altimétrico).

13. A classificação das imagens Sentinel-2 baseada em índices espectrais (NDVI; NWI; NDWI) e na classificação não supervisionada designada por *K-Means*, quando comparada com os “*ground truth*” gerados aleatoriamente sobre a área intertidal a montante da ponte sobre o Rio Mira, apresentou uma precisão global com UA=75% e “*Kappa*” = 68%. Este resultado é revelador de uma boa exactidão temática no processo de identificação das principais UMFS estudadas.

14. A caracterização do padrão evolutivo da zona intertidal da parte terminal do estuário do Rio Mira foi ainda descrita recorrendo a uma série de trinta anos (1986-2010) de dados Landsat 5 TM. A aplicação da metodologia de Laengner et al. (2019), cujo “*script*” permite o acesso ao catálogo de imagens do “*Google Earth Engine (GEE) Computing Platform*”, mostrou-se vantajoso como método comparativo para a identificação de variações nas áreas de raso de maré e de sapal. No entanto, a operacionalização de uma árvore de decisão, baseada na aplicação de limiares aos índices NDVI e NDWI, cria dificuldades na selecção de imagens coincidentes com a BM. Assim sendo, se estivermos a analisar a evolução morfossedimentar num estuário de pequenas dimensões como o caso do estuário do Rio Mira, pode ficar comprometida a estimativa da área intertidal real que é essencial na comparação interanual da evolução da área

coberta por cada uma das classes (sapal e/ou raso de maré). Esta limitação da metodologia de Laengner et al. (2019) faz com que a classificação final resultante da análise de dados Landsat 5 TM, apesar de considerar uma série longa de dados (24 anos), possa não descrever de forma correcta o padrão de evolução estuarina que se pretende caracterizar.

Bibliografia

Adão, H. (2004). *Dinâmica das comunidades de meiofauna em sedimentos associados aos povoamentos de Zostera noltii no estuário do Rio Mira*. Dissertação de Doutoramento em Geologia. Universidade de Évora, 423p.

Alday, M., Cearreta, A., Cachão, M., Freitas, M.C., Andrade, C., Gama, C. (2006). Micropalaeontological record of Holocene estuarine and marine stages in the Corgo do Porto rivulet (Mira River, SW Portugal). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 66, 532-543.

Allen, J.R.L. (2000). Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe. *Quaternary Science Reviews*. 19 (12), 1155-1231.

Amorim, A. (2015). *Detecção remota e geoprocessamento automático no estudo da evolução de margens estuarinas (Estuário do Tejo)*. Dissertação de Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território. Universidade de Lisboa. 55p.

Antunes, C. (2012). *Implicação da subida do NMM na necessidade de revisão dos sistemas de referência verticais*. ENGA-3º Encontro Nacional de Geodesia Aplicada. LNEC 18 e 19 de outubro de 2012.17. Lisboa. Portugal.

Baptista, P.; Cunha, T.; Bernardes, C.; Gama, C.; Ferreira, Ó.; Dias, J. (2011). A precise and efficient methodology to analyse the shoreline displacement rate. *Journal of Coastal Research*. 27 (2), 223 - 232. DOI: 10.2112/09-1187.1

Barillé, L.; Robin, M.; Harin, N.; Bargain, A.; Launeau, P. (2010). Increase in seagrass distribution at Bourgneuf Bay (France) detected by spatial remote sensing. *Aquatic Botany* 92, 185-194.

Béllon, B.; Bégué, A.; Lo Seen, D.; Aparecido de Almeida, C.; Simões, M. (2017). A Remote Sensing Approach for Regional-Scale Mapping of Agricultural Land-Use Systems Based on NDVI Time Series. *Remote Sensing* (9), 600; doi:10.3390/rs9060600.

Blanton, J.O., Ferreira, M.A. & Andrade, F.A. (2000). Effect of a broad shallow sill on tidal circulation and salt transport in the entrance to a coastal plain estuary (Mira-Vila Nova de Milfontes, Portugal). *Estuaries* 23, 293-304.

Boski, T., Moura, D., Sousa, C., Gomes, A., Pereira, L., Oliveira, S., Santana, P. (2013). *Mudança do nível do mar no Golfo de Cadiz durante o Plistocénico tardio e Holocénico*. Geología y Geomorfología de sistemas litorales, VIII Reunión de Cuaternario Ibérico, La Rinconada, Sevilla, Espanha, 165-168.

Bué, I.; Catalão, J.; Semedo, Á. (2020). Intertidal Bathymetry Extraction with Multispectral Images: A Logistic Regression Approach. *Remote Sensing* 12, 1311; [doi:10.3390/rs12081311](https://doi.org/10.3390/rs12081311)

Caballero, I., Stumpf R.P. (2019). Retrieval of nearshore bathymetry from Sentinel-2A and 2B satellites in South Florida coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 226, 106, 277. doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106277.

Calleja, F., Galván, C., Silió-Calzada, A., Juanes, J.A., Ondiviela, B. (2017). Long-term analysis of *Zostera noltei*: a retrospective approach for understanding seagrasses' dynamics. *Marine Environmental Research* 130, 93-105. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.07.017>.

Calleja, F.; Ondiviela, B.; Galván, C.; Recio, M.; Juanes, J. A. (2019)- Mapping estuarine vegetation using satellite imagery: The case of the invasive species *Baccharis halimifolia* at a Natura 2000 site. *Continental Shelf Research* 174, 35-47.

Cabral, J., Brito Mendes, V., Figueiredo, P., Brum da Silveira, A., Pagarete, J., Ribeiro, A., Dias, R., Ressurreição, R. (2017). Active tectonics in Southern Portugal (SW Iberia) inferred from GPS data. Implications on the regional geodynamics. *Journal of Geodynamics*, 112, 1-11.

Cabral, J. (1995). Neotectónica em Portugal Continental. Memórias do Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, 31, 265 p.

Cabral, J. (2012). Neotectonics of mainland Portugal: state of the art and future perspectives. *Journal of Iberian Geology*, 38 (1), 71-84.

Carvalho, D. (1976). Considerações sobre o vulcanismo de Cercal-Odemira. Suas relações com a Faixa Piritosa. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, tomo LX, 215-238.

Chatziantoniou, A.; Petropoulos, G.; Psomiadis, E. (2017). Co-Orbital Sentinel 1 and 2 for LULC Mapping with Emphasis on Wetlands in a Mediterranean Setting Based on Machine Learning. *Remote Sensing* 9, 1259; doi:10.3390/rs9121259.

Choi, J-K; Ryu, J-H; Lee, Y-K; Yoo, H-R; Woo, H-J; Kim, C-H (2010). Quantitative estimation of intertidal sediment characteristics using remote sensing and GIS. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 88, 125-134.

Chuvieco, E. (2016). *Satellite Remote Sensing An Environmental Approach*. 2ª edição. CRC Press, Taylor & Francis Group. 457 p.

Costa, M. J., Catarino, F. & Bettencourt, A. (2001). The role of salt marshes in the Mira estuary (Portugal). *Wetlands Ecology and Management*, 9, pp. 121-134.

Council of the European Union, 1992. Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora.

Dalrymple, R. W.; Zaitlin, B. B. & Boyd, R. 1992. "A Conceptual Model of Estuarine Sedimentation". *Journal of Sedimentary Petrology*, 62, 1130-1146.

DGT (2018). PNPOT. Alteração.DIAGNÓSTICO. Direcção Geral do Território. 6 Julho 2018. 225p. <http://pnpot.dgterritorio.gov.pt/documentos>.

Dias, R.P., Cabral, J. (2002). Actividade neotectónica na região do Algarve (S de Portugal). *Comunicações do Instituto Geológico e Mineiro*, 89, 193-208.

Donchyts, G.; Schellekens, J.; Winsemius, H.; Eisemann, E.; Van de Giesen, N. (2016). A 30 m Resolution Surface Water Mask Including Estimation of Positional and Thematic Differences Using Landsat 8, SRTM and OpenStreetMap: A Case Study in the Murray-Darling Basin, Australia. *Remote Sensing* 8(5), 386. <https://doi.org/10.3390/rs8050386>.

ESA, 2015-[https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2 User Handbook](https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook)

Estornell, J.; Martí-Gavilá, J.M.; Sebastiá, M. T.; Mengual, J. (2013). Principal component analysis applied to remote sensing. *Modelling in Science Education and Learning Volumen* 6(2), No. 7, 83-89. Instituto Universitario de Matemática Pura y Aplicada.

FAST, de Vries, M., Möller, I., Van der Wal, D., Peralta, G., Stanica, A. (2014). FAST - Foreshore Assessment using Space Technology.

FAST (2017)- Foreshore Assessment Using Space Technology. D.5.12 – Release of regionalised MI-SAFE functional prototype for case study sites. Deliverable No: 5.12. Ref.: WP5. <https://fast.openearth.eu/index.htm>

Feio, M. (1951). A evolução do relevo do Baixo Alentejo e Algarve. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, tomo XXXII, 2, 303-477.

Figueiredo, P.M. (2015). *Neotectonic and Seismotectonic Studies along the Southwest Portugal sector: Implications for the regional seismicity*. Dissertação de Doutoramento. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 263 p.

Flor-Blanco, G. e Flor G. (2019). Cantabrian Estuaries. In J. A. Morales (Ed.) *The Spanish Coastal Systems Dynamic Processes, Sediments and Management*, (1ª ed., pp. 415-436). Springer Nature Switzerland.

Gama, C.P (2005). *Dinâmica de Sistemas Sedimentares do Litoral Ocidental Português a sul do Cabo Espichel*. Dissertação de Doutoramento em Geologia. Universidade de Évora, 359p.

Gama, C.; Coelho, C.; Baptista, P.; Albardeiro, L. (2011). Equilibrium configuration of sandy embayed beaches from the Southwest Portuguese rocky coast", 11th International Coastal Symposium, In 11th International Coastal Symposium, Szczecin.

Guo, M., Li, J., Sheng, C., Xu, J., Wu, L. (2017). A review of wetland remote sensing. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s17040777> (Switzerland).

Hagenaars, G.; de Vries, S.; Luijendijk, A.P.; Boer, W.P.; Reniers, J.H.M. (2018). On the accuracy of automated shoreline detection derived from satellite imagery: A case study of the sand motor mega-scale nourishment. *Coastal Engineering* 133, 113-125.

Jensen, J. R. (2014). *Remote Sensing of the Environment An Earth Resource Perspective*. 4ª Edição. Pearson Education Limited. Edinburgh Gate. Harlow. 613 p.

Kaplan & Avdan (2017) Kaplan & Avdan, 2017- Object-based water body extraction model using Sentinel-2 satellite imagery, *European Journal of Remote Sensing* 50 (1), 137-143.

Kleyn, H.F.W. (1960). Contribution to the geology of the Odemira-São Luis region (Southern Portugal). Amsterdam University, The Hague, Mouton, 114 p.

Kye-Lim, K.; Kim, B-J; Lee, Y-K; Ryu, J-H (2019). Generation of a Large-Scale Surface Sediment Classification Map using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Data: A Case Study at the Hwang-do Tidal Flat, Korea. *Remote Sensing*. doi:10.3390/rs11030229

Kuenzer, C.; Heimhuber, V.; Huth, J.; Dech, S. (2019)- Remote Sensing for the Quantification of Land Surface Dynamics in Large River Delta Regions-A Review. *Remote Sensing* (11): 1985; doi:10.3390/rs11171985.

Laengner, M. L., Siteur, K., van der Wal, D. (2019). Trends in the Seaward Extent of Saltmarshes across Europe from Long-Term Satellite Data. *Remote Sensing* 11(14):1653. DOI: 10.3390/rs11141653

Laengner, M.L.; Siteur, K.; van der Wal, D. (2020) Correction: Laengner, M. L., et al. Trends in the Seaward Extent of Saltmarshes across Europe from Long-Term Satellite Data. *Remote Sensing* 2019, 11, 1653. *Remote Sensing*. 12, 312.

Liang, S.; Li, Xiaowen; Wang, J. (2012). *Advanced Remote Sensing Terrestrial Information Extraction and Applications*. Academic Press. Elsevier. San Diego. 799 p.

Lopes, C; Mendes, R.; Caçador, I.; Dias, J.M. (2019). Evaluation of long-term estuarine vegetation changes through Landsat imagery. *Science of the Total Environment* 653, 512-522.

Luijendijk, A.; Gerben, H.; Ranasinghe, R.; Baart, F.; Donchyts, G.; Aarninkhof, S. (2018). The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*. doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6.

Mahdianpari, M.; Salehi, B.; Mohammadimanesh, F.; Homayouni, S.; Gill, E. (2018). The First Wetland Inventory Map of Newfoundland at a Spatial Resolution of 10

m Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Data on the Google Earth Engine Cloud Computing Platform. *Remote Sensing*, 11, 43; doi:10.3390/rs11010043.

Masselink, G. & Hughes, R. (2003) – Introduction to Coastal Processes and Geomorphology. Hodder Arnold, 354 p.

Mather, P.M. and Coch, M. (2011). Computer Processing of Remotely Sensed Images (4ª edição). Chichester, U.K.: John Wiley & Sons.

McFeeters, S.K. (1996) The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1425-1432. <http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714>

Lang, M.W., Bourgeau-Chavez, L.L., Ralph W. Tiner, R.W., Klemas, V.V. (2014). Advances in Remotely Sensed Data and Techniques for Wetland Mapping and Monitoring. In (Eds.) Ralph W. Tiner; Megan W. Lang; Victor V. Klemas, Remote Sensing of Wetlands (1ª ed., chapter 5, pp.79-108). CRC Press Taylor & Francis Group.

Murray, N. J., Phinn, S. R., Clemens, R. S., Roelfsema, C. M. & Fuller, R. A. (2012). Continental scale mapping of tidal flats across East Asia using the Landsat archive. *Remote Sensing* 4, 3417-3426.

Murray N. J., Phinn, S. R., DeWitt, M., Ferrari, R., Johnston, R., Lyons, M. B., Clinton, N., Thau, D., Fuller, R. A. (2019). The global distribution and trajectory of tidal flats. *Nature*, 565, 222-225. doi.org/10.1038/s41586-018-0805-8

NEREUS, European Space Agency and European Commission (2018). “The Ever Growing use of Copernicus across Europe’s Regions: a selection of 99 user stories by local and regional authorities”, 277 p.

Oliveira, J.T. (1984). *Notícia Explicativa da Folha 7. Carta Geológica de Portugal*. Escala 1:200 000. Serviços Geológicos de Portugal, (coord.), Lisboa, 77 pp.

Pacheco, A.; Horta, J.; Loureiro, C.; Ferreira, Ó (2015). Retrieval of nearshore bathymetry from Landsat 8 images: A tool for coastal monitoring in shallow waters. *Remote Sensing of Environment* 159, 102-116.DOI: 10.1016/j.rse.2014.12.004

Pardo-Pascual, J.; Sánchez-García, E.; Almonacid-Caballer, J; Palomar-Vázquez, J.; Priego de los Santos, E.; Fernández-Sarriá, A.; Balaguer-Beser, Á. (2018). Assessing

the Accuracy of Automatically Extracted Shorelines on Microtidal Beaches from Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*. 2018, 10, 326; doi:10.3390/rs10020326

Pimentel, N.L., Amaro, H. (2000). Contribuição para a análise tectono-sedimentar do Fosso de Aljezur (SW de Portugal). *Ciências da Terra*, 14, 233-242.

Poursanidis, D.; Dimosthenis, T.; Reinartz P.; Chrysoulakisa, N. (2019). On the use of Sentinel-2 for coastal habitat mapping and satellite-derived bathymetry estimation using downscaled coastal aerosol band. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation* (80), 58-70.

Ramos Pereira, A, Ramos, C. (2020). The Southwest Coast of Portugal, In: G. Vieira, J.L. Zêzere, C. Mora (eds.), *World Geomorphological Landscapes* (109-116). Springer.

Ramos Pereira, A. (2005). Sea level changes and neotectonics: some examples in Portugal (Arrábida and Southwest). In: *Global Change, Sea Level Change and Coastal Dynamics*, Associação Portuguesa para o Estudo do Quaternário e FLUP, Reitoria da Universidade do Porto, Porto, 1-6.

Ramos Pereira, A. (2004). A faixa litoral. In: M. Feio, S. Daveau (eds.). *O relevo de Portugal. Grandes unidades*. Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos, Volume II., Coimbra, 133-145.

Ramos Pereira, A. (1994). A evolução geomorfológica da costa sudoeste. In: A. Ramos Pereira, H. Regnaud, J. Alveirinho Dias, M. M. Laranjeira (Eds.), *Contribuições para a Geomorfologia e Dinâmicas Litorais em Portugal*. Linha de Acção de Geografia Física, Relatório nº.35, Centro de Estudos Geográficos, Lisboa, 29-53.

Ramos Pereira, A. (1990). A plataforma litoral do Alentejo e Algarve ocidental. Estudo de Geomorfologia. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física, Universidade de Lisboa, 450 p.

Ressurreição, R., Dias, R., Cabral, J., Pais, J. (2014). Estratigrafia do Cenozóico no Alentejo litoral (sector Melides-Vila Nova de Milfontes). *Comunicações Geológicas*, 101, Volume Especial I, 547-550.

Ressurreição, R. (2018). Evolução tectono-estratigráfica cenozóica do litoral alentejano (sector Melides-Odemira) e enquadramento no regime geodinâmico actual. Dissertação de Doutoramento em Geologia. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 296 p.

Ryu, J.H., Won, J.S., Min, K.D., 2002. Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat: a case study in Gomso Bay, Korea. *Remote Sensing of Environment* 83, 442–456.

Ryu, J-H; Na, Y-H; Won, J-S; Doerffer, R. 2004. A critical grain size for Landsat ETMC investigations into intertidal sediments: a case study of the Gomso tidal flats, Korea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 60, 491–502.

Sen2Cor (2016)- Configuration and User Manual. S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.3. 47 p.

Silio-Calzada, A., Barquín, J., Huszar, V.L.M., Mazzeo, N., Méndez, F., Álvarez-Martínez, J.M. (2017). Long-term dynamics of a floodplain shallow lake in the Pantanal wetland: is it all about climate? *Science of the Total Environment* 605-606, 527-540. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.183>.

Simas, T.; Nunes, J.P.; Ferreira, J.G. (2001). Effects of global climate change on coastal salt marshes. *Ecological Modelling* 139, 1-15.

Sociedade Polis Litoral Sudoeste; S.A (2015). Estudo de Impacte Ambiental do Projeto de Transposição de Sedimentos da Foz do Rio Mira para Reforço do Cordão Dunar na Praia da Franquia. Vol.III-Resumo Não Técnico. Rf14040/01, fev-15. Referência orçamental: SW.16.02.36. Contrato nº SW/14/CN013. 20p.

Teodoro, A.C.; Gonçalves, H. (2011). Extraction of Estuarine/Coastal Environmental Bodies from Satellite Data through Image Segmentation Techniques. Image Segmentation, Pei-Gee Ho (Ed.), Págs. 435-458, InTech.

Tiner, R. W. (2014). Wetlands. An Overview. In (Eds.) Ralph W. Tiner; Megan W. Lang; Victor V. Klemas, *Remote Sensing of Wetlands* (1ª ed., pp. 3- 18). CRC PressTaylor & Francis Group.

Tiner, R. W. (2014). Introduction to Wetland Mapping and Its Challenges. In (Eds.) Ralph W. Tiner; Megan W. Lang; Victor V. Klemas, *Remote Sensing of Wetlands* (1ª ed., pp.43-65). CRC PressTaylor & Francis Group.

Zhou, Z.; Qinghua, Y.; Giovanni, C. (2015). A one-dimensional biomorphodynamic model of tidal flats: Sediment sorting, marsh distribution, and carbon accumulation under sea level rise. *Advances in Water Resources*.93 (Part B), 288-302. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.10.011>.

WEBSITES

Câmara Municipal de Odemira: <https://www.cm-odemira.pt> (acedido em Setembro de 2019)

Copernicus Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (acedido em Março de 2019)

CREODIAS: <https://finder.creodias.eu/> (acedido em Agosto de 2020)

ESA (2015b). Sentinel-2 User Handbook. <https://sentinel.esa.int/> (acedido em Maio de 2019) de

Global Intertidal Change- Mapping the Global Distribution and Trajectory of Tidal Flat Ecosystems. <http://intertidal.app> (acedido em Setembro de 2019)

Instituto Hidrográfico; <https://www.hidrografico.pt/prev.mare> (acedido em Agosto de 2020)

POLIS LITORAL SUDOESTE: <http://www.polislitoralsudoeste.pt/vnmf-rio-mira> (acedido em Setembro de 2019)

QGIS: <http://www.qgis.org> (acedido em Maio de 2020)

Sentinel Playground: <https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground> (acedido em Agosto de 2020)

USGS:https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products (acedido em Fevereiro de 2020)

USGS- Spectral Characteristics Viewer: <https://landsat.usgs.gov/spectral-characteristics-viewer> (acedido em Fevereiro de 2020)

Índice de Figuras

Figura 1 - (A)- Relação entre observações da Terra e os benefícios sociais (CENR / IWGEO, 2005; adaptado de Liang et al. 2012); (B)- Modelo de interação que descreve a relação das Ciências da Informação Geográfica (Detecção Remota, Sistemas de Informação Geográfica, Cartografia e Topografia) e outras áreas de investigação como a Matemática e a Lógica, as Ciências Físicas, as Ciências Biológicas e as Ciências Sociais (adaptado de Jensen, 2014).....	2
Figura 2- Localização da área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís no sudoeste da Península Ibérica e no litoral do Alentejo (Excerto de imagem do “ <i>Google Earth Pro</i> ”).....	5
Figura 3- A planície litoral, a Serra do Cercal, a arriba e o Rio Mira na área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís. Representação tridimensional do relevo desde a linha de costa e a foz do Rio Mira na direcção do interior, para Leste, até ao sopé da Serra do Cercal (Excerto de imagem do “ <i>Google Earth Pro</i> ”).....	6
Figura 4- Mapa geológico simplificado da área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís (adaptado de Oliveira, 1984); Complexo Vulcano-Silicioso (Devónico superior): 1- Formação de São Luís; 2- rochas máficas; 3- rochas félsicas; Grupo de Flysch do Baixo Alentejo (Carbónico): 4- Formação de Mira; 5- Formação da Brejeira; Depósitos de Cobertura (Plio-Quaternário): 6- Areias, arenitos e cascalheiras do Plio-Pleistocénico; 7- Areias de duna de praia, aluviões do Holocénico.....	8
Figura 5- A arriba fóssil, a planície litoral escalonada por efeito da tectónica, o Rio Mira e a Serra do Cercal. Corte topográfico e geológico esquemático desde a Praia das Furnas (A1; foz do Rio Mira) até ao marco geodésico Serpes (Serra do Cercal) (adaptado de Ramos-Pereira, 1990); 1- Rochas paleozóicas meta-sedimentares com dobramento; 2- Rochas sedimentares plio-pleistocénicas; 3- Falhas prováveis; 4- Sondagem (Alday et al., 2006); Localização do corte A1-A2 no excerto da Carta Militar de Portugal, folha 544- Vila Nova de Milfontes (Odemira), escala 1:25000 (Serviço Cartográfico do Exército)..	10

Figura 6- Representação esquemática das unidades estratigráficas plio-quaternárias reconhecidas na área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís (Adaptado de Ramos Pereira, 1990, 2005; Oliveira, 1984; Ressurreição, 2018).....	11
Figura 7- Representação esquemática das unidades estratigráficas holocénicas (tipo de rocha sedimentar, ambiente sedimentar e datações com Carbono-14) da sondagem realizada na ribeira do Corgo do Porto da Mó, afluente do Rio Mira na área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís (Adaptado de Alday et al., 2006).....	12
Figura 8- Esquema ilustrativo dos diferentes sub-ambientes do sector terminal de um estuário (adaptado de Flor-Blanco, G. e Flor G. (2019).....	14
Figura 9- Esquema ilustrativo da morfodinâmica sedimentar do ambiente sedimentar estuarino, incluindo os processos biofísicos (adaptado de Zhou et al.2015).....	15
Figura 10- (A)- Pluma turbida do Rio Mira, 2018-03-21; (B)- Entrada de água salgada para o interior do estuário com a progressão da maré, 2018-03-16. Imagens Sentinel-2 (RGB); (C)- Registo da precipitação acumulada (mm) na estação meteorológica de Sines (Fonte: IPMA).....	17
Figura 11- Principais unidades morfossedimentares (UMFS) da parte terminal do estuário do Rio Mira.....	21
Figura 12- Posição relativa das unidades morfossedimentares (UMFS) raso de maré e sapal na zona intertidal, considerando o ciclo de maré (adaptado de Zhou et al., 2015)...	22
Figura 13- Resolução espacial e amplitude espectral das imagens Sentinel-2 (<i>Sen2Cor</i> , 2016).....	33
Figura 14- Fluxograma metodológico aplicado aos dados Sentinel-2 (1), aos dados Landsat 5 TM (2) e na descrição dos dados auxiliares (3).....	36
Figura 15- (A) Resolução espacial e amplitude espectral dos dados Landsat 4-5 TM (“ <i>Thematic Mapper</i> ”). (Fonte: https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products); (B)- Comparação entre as bandas Sentinel-2 e Landsat 5TM e três curvas espectrais	

exemplificativas: vegetação rasteira; “água límpida” e “água turva” (<https://landsat.usgs.gov/spectral-characteristics-viewer>).....38

Figura 16- Caracterização das máscaras. (A)- Sentinel-2: (1)- Digitalização do limite máximo da Preia-Mar (PM) e do campo dunar da Praia das Furnas; (2)- Digitalização do limite mínimo de baixa-Mar (BM); (3) Subtracção das máscaras [1-2=Área intertidal] e (4) Máscara intertidal. (B)- Landsat 5 TM: Máscara “GEE”40

Figura 17- (A)- Máscara “AQUA” usada no pré-processamento das imagens Sentinel-2 para o estudo da morfologia da barra da Praia da Franquia; (B)- Enquadramento das principais unidades morfossedimentares (UMFS) do sector distal do estuário do Rio Mira, descritas pelas classes identificadas na máscara “AQUA”: barra arenosa (ba), praia estuarina (pe) e margem do rio formada por cascalho/rocha consolidada (Mgc) e campo dunar (duna).....41

Figura 18- Fluxograma metodológico aplicado ao estudo da zona intertidal e árvore de decisão da metodologia de Calleja et al. (2017): (1) definição da área de interesse; (2) aplicação dos limiares do índice NDVI e da ACP, e (3) índices VARIGreen e EVI2 e classificação não supervisionada “K-Means”43

Figura 19- Imagem S2 de 2019-09-02. (1) Bandas S2A; (2) Cálculo do índice NDVI; (3) Classificação não supervisionada do NDVI (“KMeans”; 6 classes); (4) Interpretação de cada um dos “clusters”; (5) Polígonos resultantes do processo de vectorização do raster da classificação e (6) Áreas ocupadas por cada classe (LC) presentes na área intertidal...45

Figura 20- Imagem S2 de 2019-09-02. (1) Determinação do índice NDWI considerando a máscara “AQUA”; (2) Aplicação do limiar do NDVI $\tau_{=0.16}$; (3) Classificação não-supervisionada aplicada à banda derivada NDWI (“K-Means”; 4 classes) e (4) Classificação não supervisionada aplicada às bandas espectrais B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B11 e B12.....48

Figure 21- Estrutura de uma Matriz de Confusão (“Confusion Matrix”), adaptado de Chuvieco (2016).....51

Figure 22- Metodologia de Laengner et al. (2019, 2020): A- Modelo da área estuarina baseada em três classes: Sapal (“salt marsh”); Raso de Maré (“Mud Flat”) e Água (“Water”) e o nível da água associado à oscilação da maré: HAT- “Highest Astronomical

<i>Tide</i> "; LAT- " <i>Lowest Astronomical Tide</i> "; B- Árvore de decisão não supervisionada, baseada na aplicação dos limiares dos índices $NDVI_{\tau > 0.3}$ e $NDWI_{\tau > 0}$ (adaptado de Laengner et al., 2019, 2020).....	54
Figure 23- MDT da área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís.....	57
Figura 24- Representação tridimensional na escala de cores cinzenta "hillshade" da área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís; linhas a vermelho indicam os principais alinhamentos definidos à superfície; linha a azul representa o Rio Mira.....	58
Figura 25- Mapa geológico simplificado da área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís (adaptado de Oliveira, 1984); A legenda é igual à da figura anterior; Note-se a sobreposição das curvas de nível dos 50, 200 e 300m (linhas a tracejado a preto) e os principais alinhamentos definidos à superfície através da representação tridimensional na escala de cores cinzenta "hillshade" (linhas a vermelho); linha a azul representa o Rio Mira.....	60
Figura 26- Localização da área de estudo de Vila Nova de Milfontes- Cercal- São Luís (quadrado com limite a branco) no sudoeste de Portugal (Excerto de imagem do Google Earth), assinalando as principais falhas plio-quadernárias (adaptado de Dias e Cabral, 2002; Cabral et al., 2017); (1)- traçado do rio Mira; (2), falha; (3)- Falha provável; (4)- Movimento de blocos na falha do tipo desligamento; localidades: ALJ- Aljezur, MS- Messejana, QT- Quarteira, SMS- São Marcos da Serra, ST- São Teotónio, VNM- Vila Nova de Milfontes.....	62
Figura 27- Mapa dos valores do índice NDVI na zona intertidal para as três imagens estudadas (2015, 2018 e 2019).....	66
Figura 28- Mapa relativo à aplicação dos limiares do $NDVI_{\tau = 0.2; 0.3}$ para as 3 datas estudadas (2015, 2018 e 2019). Áreas 1, 2 e 3.....	67
Figura 29- Análise comparativa das três primeiras componentes obtidas pela ACP das bandas espectrais B2, B3, B4, B8 e B11.....	69
Figura 30- Imagem S2- 2019-09-02. (A)- Aplicação do limiar $NDVI_{\tau > 0.3}$; (B)- Classificação não supervisionada do NDVI ("KMeans"; 6 classes); (C)- Aplicação do filtro ("Median 3x3") à classificação NDVI+"KMeans"; 6 classes); (D)- Polígonos resultantes do processo de vectorização do "raster" da classificação.....	72

Figura 31- Mapas na zona intertidal: (A)- Segmentação simples da área intertidal e (B)- classes resultantes da transformação do “ <i>raster</i> ” da classificação não supervisionada (“ <i>KMeans</i> ”; 6 classes+ <i>Median 3×3</i> ”) do índice NDVI, em vectorial, para imagem S2-2019-09-02.....	73
Figura 32- (A)- Identificação das seis classes resultantes da transformação do <i>raster</i> da “Classificação não supervisionada do índice NDVI” para a imagem S2 de 2019-09-02; (B)- representação dos 300 pontos aleatórios (“ <i>ground truth points</i> ”), gerados para validação da classificação não supervisionada sobre a imagem “ <i>GoogleEarthPro</i> ®”); Linha laranja (margem do rio; Mgrc-metagrauvaques; quartzitos).....	76
Figura 33-(A)- Resultado da reclassificação da classificação não supervisionada, “ <i>NDWI_Kmeans_6 Classes</i> ” (2019-09-02); (B)- Matriz de confusão obtida após classificação dos 131 de “ <i>ground truth points</i> ” aleatórios e (C)- representação dos 131 pontos aleatórios (“ <i>ground truth points</i> ”) gerados para validação da classificação não supervisionada sobre a imagem “ <i>GoogleEarthPro</i> ”®).....	78
Figura 34- Imagem S2 de 2015-08-04. (A)- Aplicação do limiar $NDVI_{\tau>0.3}$; (B)- Classificação não supervisionada (NDVI; “ <i>K-Means</i> ; 6 classes”); (C)- Filtro (“ <i>Median 3×3</i> ”) aplicado à classificação NDVI (B).....	80
Figura 35-Imagem S2 de 2018-03-21. Classificação não supervisionada sobre o índice NWI (“ <i>K-Means</i> ”; 6 classes).....	84
Figura 36- Gráfico Box-Plot da reflectâncias da imagem S2 de 2018-03-21, considerando a área mais extensa que descreve a classe de raso de maré (polígono 465).....	87
Figura 37- Padrão de inundação da área intertidal entre a foz e o Parral, tendo por base o cálculo do índice NDWI: (A)- PM de “Marés Vivas; 2020-06-03: 12:29; 3.3m; e (B)- 2019-09-07: 10:03; 2.7m Preia-mar (“Marés Mortas”). Estimativa das áreas imersa e emersa.....	89
Figura 38- Resultado da “ <i>Land Cover Change-LCC</i> ” entre as áreas inundadas em período de PM de “Marés Vivas” (2020-06-03; 12:29 UTC; 3.3m) e de “Marés Mortas” (2019-09-07; 10:30 UTC; 2.7m). Tabela- Estimativa da área das classes mais representativas da área intertidal estudada.....	91

- Figura 39- Pormenor de uma área de sapal (área $\approx 0.026 \text{ km}^2$) junto ao Montalvo (4.6 km a montante da foz). (A)- Imagem do Google Earth Pro; (B)- Classificação não supervisionada (NDVI; “*K-Means*”; 3 classes) e (C)- Cobertura da vegetação halófito de acordo com Catarino e Serôdio (1992; *in* Costa et al., 2001).....94
- Figura 40- Ilustração da aplicação dos procedimentos para proceder à estimativa da área das classes incluídas na máscara “*AQUA*”, tendo por base a imagem S2 de 2019-09-02. RGB- imagem em cor natural “*Red*” (R), “*Green*” (G) e “*Blue*” (B); (1)- NDWI- “*Normalized Difference Water Index*”; (2)- Aplicação do limiar $\text{NDWI}_{\tau > 0.16}$; (3)- Classificação não supervisionada “*K-Means*” do índice NDWI e (4)- Classificação não supervisionada (“*K-Means*”; 4 classes) tendo por base as bandas: B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B11 e B12.....99
- Figura 41- Avaliação da evolução morfológica e da área da barra arenosa junto à ponte do Rio Mira, com intervalo de 2 anos (2017-12-06 e 2019-09-02), em período de BM de “*Marés Vivas*” (0.4 m).....101
- Figura 42- Análise comparativa entre os dados relativos ao: (A)- Levantamento topo-hidrográfico de 2019-02-06; (09:30; 0.8m) Escala: 1/2000; (B)- Imagem S2 de 2019-02-09 (11:04; 0.9m- BM) e (C)- Imagem S2 de 2019-03-11 (11:06; 0.9m- BM). (1-2) - Barra da Franquia; (3) - barra arenosa a jusante da ponte. Tabela com os valores das áreas estimadas.....103
- Figura 43- Evolução da morfologia da barra arenosa da Praia da Franquia entre 8 de Agosto de 2015 e 22 de Agosto de 2020. A morfologia da barra é representada pelo vector a cor-de-laranja (área km^2 , Tabela 5), sobre o vector de contorno a verde (1 a 10) referente à imagem S2- 2017-12-06 (10:10-0.4m). Em A e B o vector verde de contorno refere-se à imagem S2- 2017-08-13. Em 1;3; 6 e 10 é apresentada a imagem RGB-Sentinel-2). A imagem de fundo do Google Earth Pro é do dia 2014-06-01.....106
- Figura 44- Ilustração do recuo do limite setentrional do campo dunar adjacente à Praia das Furnas. Levantamento topo-hidrográfico 2019-02-06 (Fig. 42) e fotografias obtidas nas campanhas de campo de 2019-12-26.....109

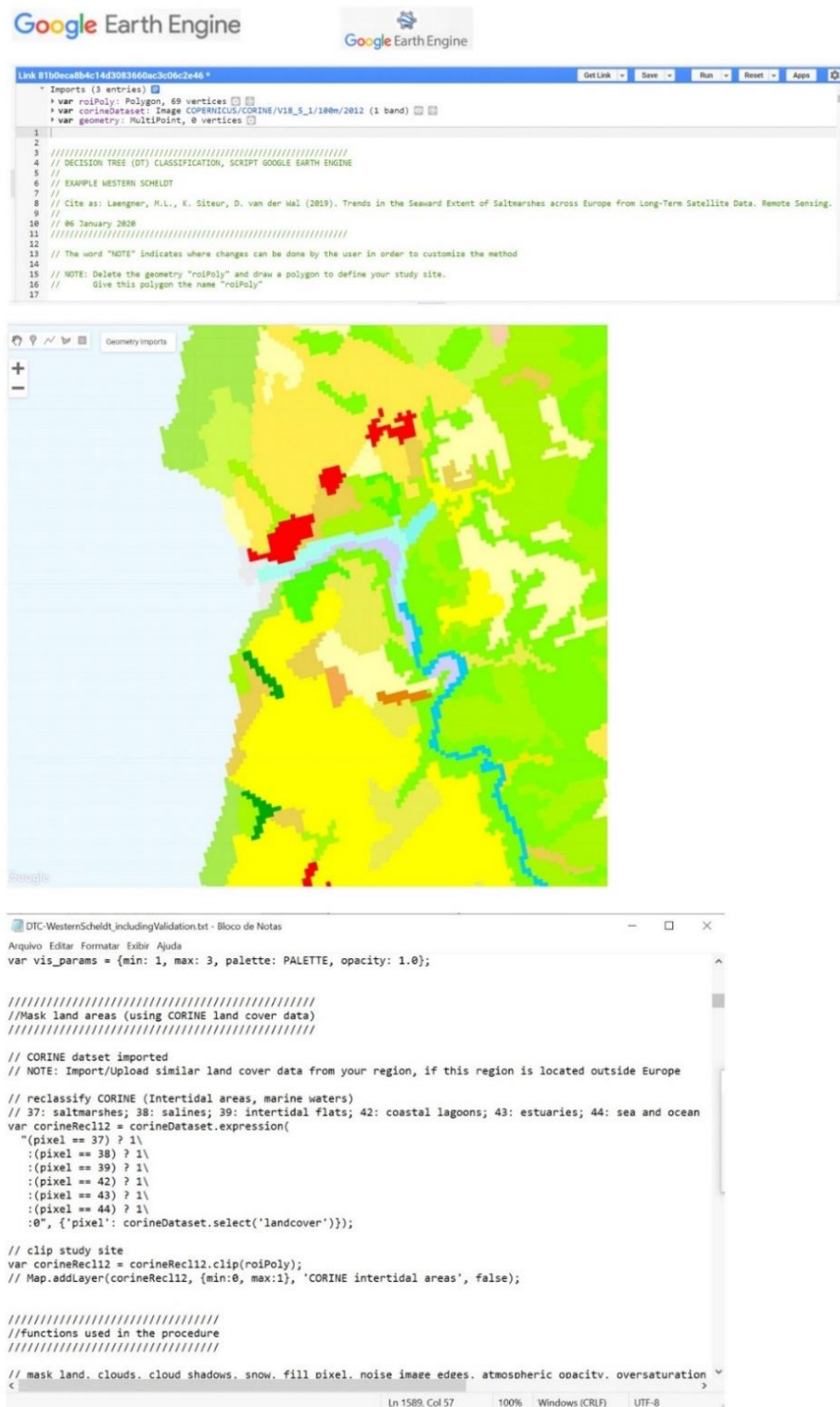
Figura 45- Resultados da aplicação da metodologia de classificação de Laengner et al. (2019): Mapas tri-anuais da cobertura das classes de sapal; raso de maré e água, entre 1986 e 2010. Gráfico e Tabela da evolução da área em km ²). Dados Landsat 5 TM, “GEE”).....	112
Figura 46- Análise comparativa da classificação Laengner et al. (2019), baseada em dados Landsat 5 TM para o ano de 1995 <i>versus</i> a fotografia aérea de 1995 (escala 1:15 000). (4) Alto sapal delimitado com a linha verde.....	114
Figura 47- Análise comparativa da classificação Laengner et al. (2019), baseada em dados Landsat 5 TM para o ano de 2001 <i>versus</i> fotografia aérea de 2001 (escala 1:15 000). A linha a amarelo indica a zona coberta por “ervas marinhas”	115

Lista de Tabelas

Tabela 1- Breve descrição das UMFS consideradas na descrição do sector terminal do estuário do Rio Mira.....	23
Tabela 2- Índices de vegetação e de água. NIR=B8; “Red”=B4; “Green”=B3; “Blue”=B2.VIS-“Visible” e IR-“Infrared”.....	30
Tabela 3- Distribuição das principais classes identificadas na área intertidal, tendo por base a classificação não supervisionada sobre o índice NWI (“K-Means”; 6 classes) da Imagem S2- 2018-03-21 (Fig.35).....	85
Tabela 4- Lista de imagens Sentinel-2 (S2) consideradas no estudo da evolução morfológica das barras arenosas. Sensores: S2A e S2B; BM- “Baixa-Mar”; UTC- <i>Universal Time Coordinated</i> . t ₀ -Dragagem da barra arenosa em frente à praia estuarina da Franquia e realimentação da Praia das Furnas; t _{barra incipiente} - barra já visível na imagem S2 RGB mas o nível da maré não permite a delimitação da sua configuração; t ₁ a t ₈ - datas das imagens que permitiram acompanhar a evolução da configuração da nova barra (pós-dragagem); t ₂ - data próxima do levantamento topo-hidrográfico cedido pela CCDRA (06/02/2019).....	97
Tabela 5- Estimativa das áreas (km ²) das principais classes cobertas pela máscara “AQUA”. (a cinzento) o polígono final incluía a totalidade da margem norte do rio, não permitindo a individualização do polígono que descrevem apenas a Praia da Franquia. BM- “Baixa-Mar” prevista para o marégrafo de Sines (https://www.hidrografico.pt/m.mare); UTC- <i>Universal Time Coordinated</i>	100

ANEXOS

Anexo I- Aspecto geral do “script” da metodologia Laengner et al. (2019, 2020) na consola da plataforma “Google Earth Engine (GEE)”



```

Link 81b0eca8b4c14d308366ac3c06c2e46+
Imports (3 entries)
var roiPoly: Polygon, 69 vertices
var corineDataset: Image CORINE/CORINE/V18_5_1/100m/2012 (1 band)
var geometry: MultiPoint, 0 vertices

1
2
3
4 // DECISION TREE (DT) CLASSIFICATION, SCRIPT GOOGLE EARTH ENGINE
5 //
6 // EXAMPLE WESTERN SCHELDT
7 //
8 // cite as: Laengner, H.L., K. Siteur, D. van der Wal (2019). Trends in the Seaward Extent of Saltmarshes across Europe from Long-Term Satellite Data. Remote Sensing.
9 //
10 // 06 January 2020
11 //
12 //
13 // The word "NOTE" indicates where changes can be done by the user in order to customize the method
14 //
15 // NOTE: Delete the geometry "roiPoly" and draw a polygon to define your study site.
16 // Give this polygon the name "roiPoly"
17

// DTC-WesternScheldt_includingValidation.txt - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
var vis_params = {min: 1, max: 3, palette: PALETTE, opacity: 1.0};

// Mask land areas (using CORINE land cover data)
// CORINE dataset imported
// NOTE: Import/Upload similar land cover data from your region, if this region is located outside Europe

// reclassify CORINE (Intertidal areas, marine waters)
// 37: saltmarshes; 38: salines; 39: intertidal flats; 42: coastal lagoons; 43: estuaries; 44: sea and ocean
var corineRecl12 = corineDataset.expression(
  "(pixel == 37) ? 1\
  : (pixel == 38) ? 1\
  : (pixel == 39) ? 1\
  : (pixel == 42) ? 1\
  : (pixel == 43) ? 1\
  : (pixel == 44) ? 1\
  : 0", {"pixel": corineDataset.select('landcover')});

// clip study site
var corineRecl12 = corineRecl12.clip(roiPoly);
// Map.addLayer(corineRecl12, {min:0, max:1}, 'CORINE intertidal areas', false);

// Functions used in the procedure

// mask land, clouds, cloud shadows, snow, fill pixel, noise image edges, atmospheric opacity, oversaturation

```

Appendix A

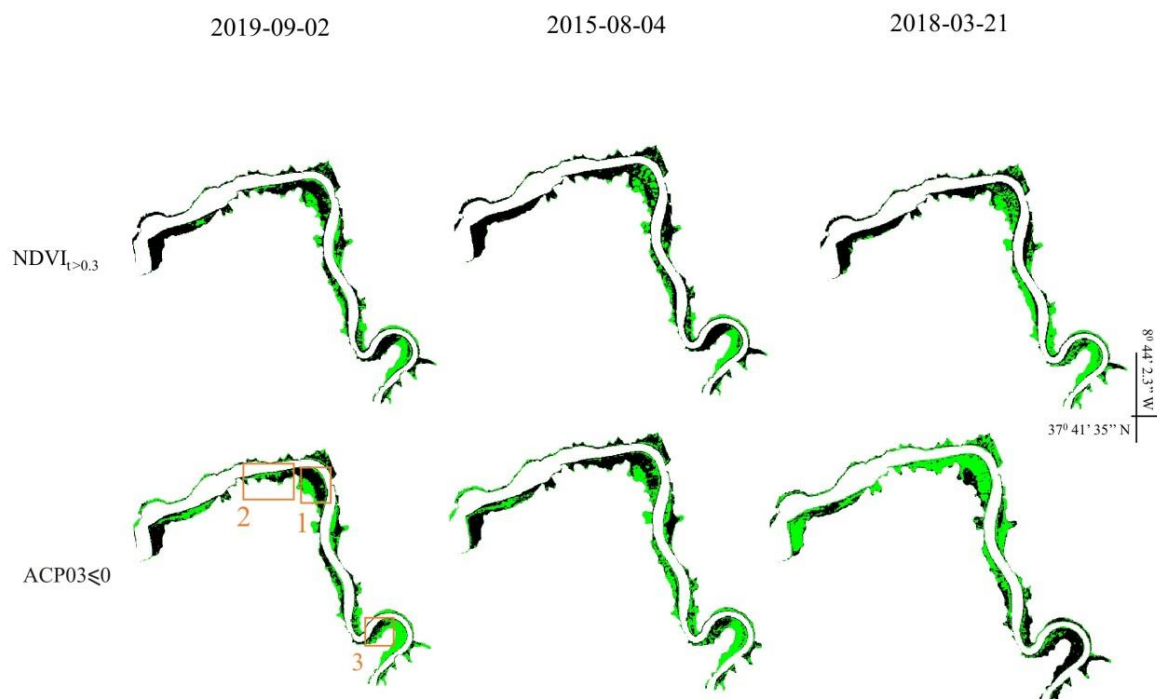
The script to apply the DT classification method we developed is provided for the Western Scheldt as an example and template here (<https://code.earthengine.google.com/1528b64867f7286dcea7028f65a356c6>).

(in Laengner et al. 2019, 2020)

Anexo II- Dados Sentinel-2

Data	Referência das Imagens Sentinel 2
2015-08-04	S2A_MSIL1C_20150804T112046_N0204_R037_T29SNB_20150804T112539
2017-06-14	S2A_MSIL1C_20170614T112111_N0205_R037_T29SNB_20170614T112422
2017-08-13	S2A_MSIL2A_20170813T112121_N0205_R037_T29SNB_20170813T112433
2017-12-06	S2B_MSIL2A_20171206T112429_N0213_R037_T29SNB_20190807T020248
2018-03-16	S2B_MSIL2A_20180316T112109_N0213_R037_T29SNB_20190807T112522
2018-03-21	S2A_MSIL2A_20180321T112111_N9999_R037_T29SNB_20200605T142013
2018-05-05	S2B_MSIL2A_20180505T112109_N0213_R037_T29SNB_20190807T125403
2018-09-27	S2A_MSIL1C_20180927T112111_N0206_R037_T29SNB_20180927T114442
2018-12-26	S2A_MSIL2A_20181226T112451_N0211_R037_T29SNB_20181226T122512
2019-02-09	S2A_MSIL1C_20190902T112111_N0208_R037_T29SNB_20190902T132637
2019-03-11	S2B_MSIL2A_20190311T112109_N0211_R037_T29SNB_20190311T153920
2019-09-02	S2A_MSIL2A_20190902T112111_N9999_R037_T29SNB_20200321T091743
2019-09-07	S2B_MSIL2A_20190907T112119_N0213_R037_T29SNB_20190907T144322
2020-03-10	S2A_MSIL2A_20200310T112111_N0214_R037_T29SNB_20200310T123418
2020-06-03	S2B_MSIL2A_20200603T112119_N0214_R037_T29SNB_20200603T145421
2020-06-08	S2A_MSIL2A_20200608T112121_N0214_R037_T29SNB_20200608T123307
2020-08-07	S2A_MSIL2A_20200807T112121_N0214_R037_T29SNB_20200807T121816
2020-08-22	S2B_MSIL2A_20200822T112119_N0214_R037_T29SNB_20200823T151025

Anexo III- Limiar $NDVI_{t>0.3}$ e $ACP03 \leq 0$



Anexo IV- Resultados da Análise de Componentes Principais (ACP) aplicado às bandas espectrais B2, B3, B4, B8 e B11 das imagens Sentinel-2 de 2015-08-04, 2018-03-21 e 2019-09-02

2019-09-02

Valores Próprios

PERCENT AND ACCUMULATIVE EIGENVALUES			
PC Layer	EigenValue	Percent of EigenValues	Accumulative of EigenValues
1	38620.36414	97.8142	97.8142
2	496.09384	1.2565	99.0706
3	336.28289	0.8517	99.9223
4	30.66951	0.0777	100.0000

Valores e Vectores Próprios

EIGENVALUES AND EIGENVECTORS					
Number of Input Layers		Number of Principal Component Layers			
PC Layer	5	4	3	2	1

Eigenvalues	38620.36414	496.09384	336.28289	30.66951	
Eigenvectors					
Input Layer					
1	0.24339	0.18285	-0.24717	0.54549	
2	0.33976	0.35021	-0.33011	0.47201	
3	0.39782	0.23511	-0.55787	-0.67805	
4	0.56843	0.37728	0.71977	-0.11907	

2015-08-04

Valores Próprios

PERCENT AND ACCUMULATIVE EIGENVALUES			
PC Layer	EigenValue	Percent of EigenValues	Accumulative of EigenValues
1	44237.19936	97.8066	97.8066
2	627.84991	1.3882	99.1948
3	349.53728	0.7728	99.9676
4	14.66777	0.0324	100.0000

Valores e Vectores Próprios

EIGENVALUES AND EIGENVECTORS					
Number of Input Layers		Number of Principal Component Layers			
PC Layer	5	1	2	3	4

Eigenvalues		44237.19936	627.84991	349.53728	14.66777
Eigenvectors					
Input Layer					
1		0.23143	-0.26733	-0.09746	0.74389
2		0.32982	-0.44067	-0.04507	0.31330
3		0.40585	-0.61997	-0.13081	-0.58843
4		0.60640	0.28368	0.74114	-0.02303

2018-03-21

Valores Próprios

PERCENT AND ACCUMULATIVE EIGENVALUES			
PC Layer	EigenValue	Percent of EigenValues	Accumulative of EigenValues
1	44237.19936	97.8066	97.8066
2	627.84991	1.3882	99.1948
3	349.53728	0.7728	99.9676
4	14.66777	0.0324	100.0000

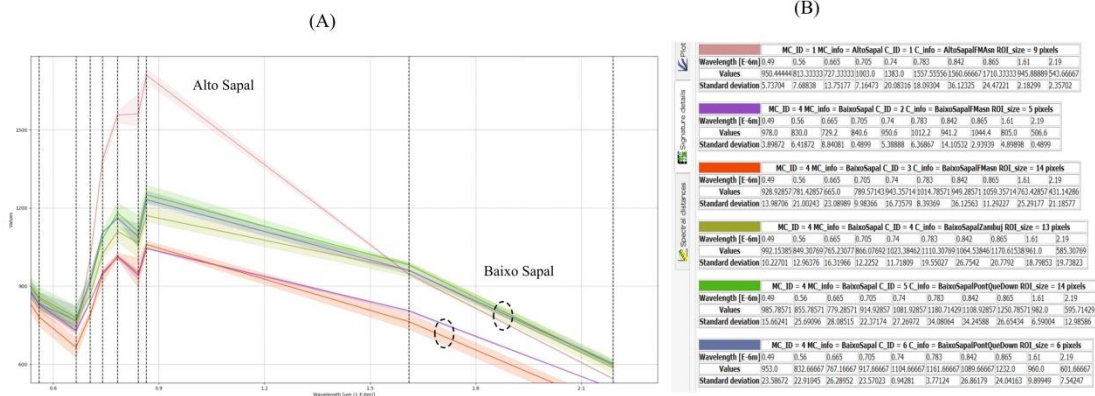
Valores e Vectores Próprios

EIGENVALUES AND EIGENVECTORS				
Number of Input Layers		Number of Principal Component Layers		
PC Layer	5	4	3	2

Eigenvalues	44237.19936	627.84991	349.53728	14.66777
Eigenvectors				
Input Layer				
1	0.23143	-0.26733	-0.09746	0.74389
2	0.32982	-0.44067	-0.04507	0.31330
3	0.40585	-0.61997	-0.13081	-0.58843
4	0.60640	0.28368	0.74114	-0.02303

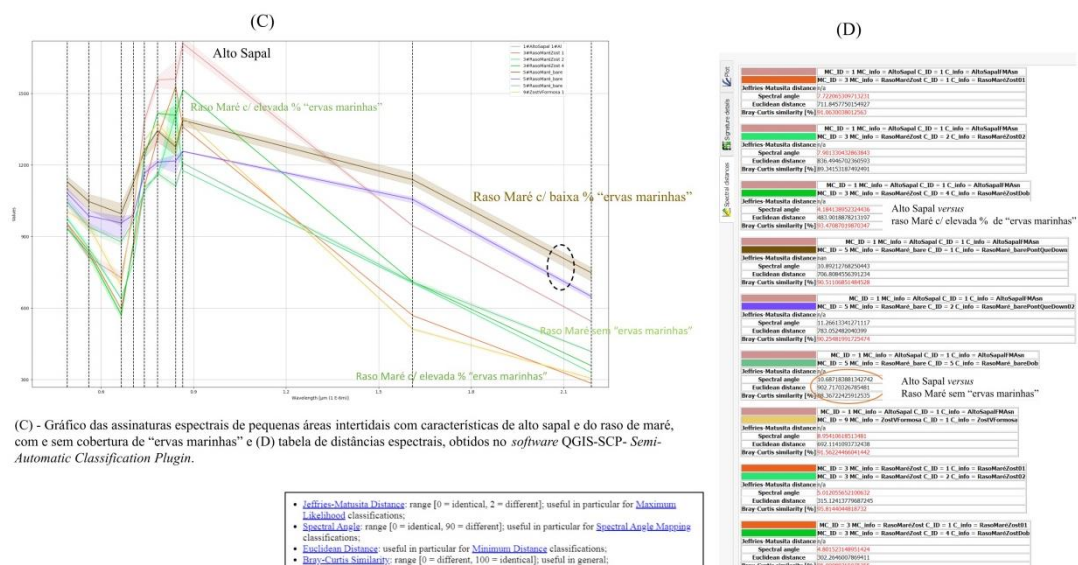
Anexo V- Gráfico das assinaturas espectrais

(A)- Gráfico das assinaturas espectrais de pequenas áreas intertidais com características de alto e de baixo sapal; (B)- Tabela de assinatura espectral obtida usando o “*QGIS-SCP- Semi-Automatic Classification Plugin*”;



(A) - Gráfico das assinaturas espectrais de pequenas áreas intertidais com características de alto e de baixo sapal e (B) e respectiva tabela de assinatura espectral (B), obtidos no software QGIS-SCP- *Semi-Automatic Classification Plugin*.

(C)- Gráfico das assinaturas espectrais de pequenas áreas intertidais com características de alto sapal e do raso de maré, com e sem cobertura de “ervas marinhas”; (D) tabela de distâncias espectrais obtidos através do “*QGIS-SCP- Semi-Automatic Classification Plugin*”.



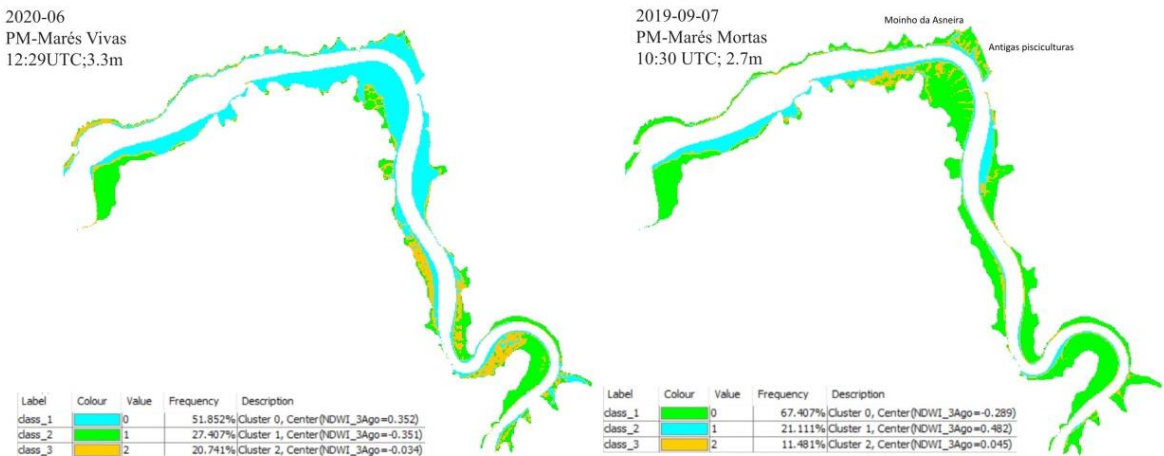
(C) - Gráfico das assinaturas espectrais de pequenas áreas intertidais com características de alto sapal e do raso de maré, com e sem cobertura de “ervas marinhas” e (D) tabela de distâncias espectrais, obtidos no software QGIS-SCP- *Semi-Automatic Classification Plugin*.

- **Jeffries-Matthews Distance:** range [0 = identical, 2 = different]; useful in particular for **Maximum** likelihood classifications;
- **Spectral Angle:** range [0 = identical, 90 = different]; useful in particular for **Spectral Angle Mapping** classifications;
- **Euclidean Distance:** useful in particular for **Minimum Distance** classifications;
- **Bray-Curtis Similarity:** range [0 = different, 100 = identical]; useful in general;

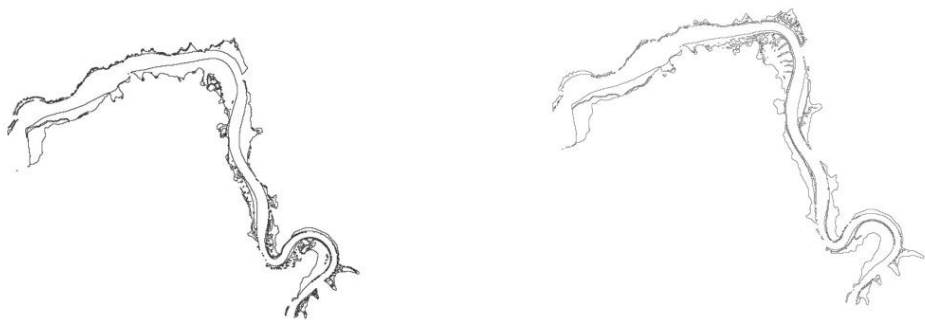
https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/en/latest/tutorial_1.html

Anexo VI- (A)- Resultados da classificação “*K-Means*”; 3 classes do NDWI e (B)- respectiva vectorização sobre as imagens Sentinel-2: 2020-06-03 (PM-Marés Vivas) e 2019-09-07 (PM-Marés Mortas)

(A) Classificação *K-Means*; 3 classes do NDWI.



(B) Vectorização da classificação *K-Means*; 3 classes do NDWI (A).



Anexo VII- Evolução da barra arenosa da Franquia: Imagens Sentinel-2, RGB e resultantes do cálculo do índice NDWI (“*Normalized Difference Water Index*”)

